

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA TECHNOLOGIE STAVEB



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Použití nekovové výztuže jako náhrady
polypropylenových vláken v tenkých deskách

Autor: Lenka Kosíková
Praha 2018

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci s názvem: „Použití nekovové výztuže jako náhrady polypropylenových vláken v tenkých deskách,, napsala samostatně a pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne 23. května 2018

Lenka Kosíková

Poděkování

Ráda bych poděkovala pražské firmě KŠ PREFA s.r.o. Jmenovitě panu Ing. Janu Markovi za řadu cenných podnětů a rad při zpracovávání mé práce a především za čas strávený nad konzultacemi. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce. V neposlední řadě bych ráda poděkovala svým rodičům za umožnění studia a všem mým blízkým za podporu.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kosíková	Jméno: Lenka	Osobní číslo: 423114
Zadávací katedra: Katedra technologie staveb (k122)		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Příprava, realizace a provoz staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Použití nekovové výztuže jako náhrady polypropylenových vláken v tenkých deskách	
Název bakalářské práce anglicky: Using of non metallic reinforcement like substitution PP fibre in thin plates	
Pokyny pro vypracování: Cílem práce je sestavení komplexních podkladů pro zhodnocení možné náhrady stávajícího vyztužení tenkých desek. Součástí práce bude posouzení problematiky z hlediska únosnosti, technologie provádění a cenové náročnosti nových variant v porovnání se stávajícím stavem. Práce bude sloužit pro variantní porovnání technologických, fyzikálně mechanických a ekonomických vlastností vyráběných prvků. Práce bude členěna dle následující struktury: 1) Rešerše k výrobě tenkých stropních betonových desek a žebrových stropních prvků. 2) Metody vyztužování tenkých betonových prvků. 3) Technologie výroby tenkých desek s ohledem na způsob vyztužení. 4) Výroba a zkoušky vzorků s různými druhy výztuže. 5) Ekonomická bilance prvků. 6) Porovnání výsledků a závěry práce. Seznam doporučené literatury: 1) KŠ Prefa a.s. - Dílenská dokumentace stropních prvků 2) SOLIDIAN - technický list nekovové výztuže 3) ŽELEX - technický list uhlíkové výztuže 4) BASF - technické listy - rozptýlená výztuž 5) ČSN EN 13 224 - Betonové prefabrikáty - Žebrové stropní prvky. Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 16.2.2018	Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Anotace

Název práce: Použití nekovové výztuže jako náhrady polypropylenových vláken v tenkých deskách

Autor: Lenka Kosíková

Katedra: Katedra technologie staveb

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

e-mail vedoucího: rostislav.sulc@fsv.cvut.cz

Anotace Bakalářská práce je zaměřena na zlepšování parametrů střešních nosníků typu TT ze železobetonu. Tento typ panelů se používá převážně pro zastřešení velkorozponových hal či průmyslových objektů. Schopnost střešních panelů překlenout velké rozpony tak výrazně urychluje výstavbu hal z prefabrikovaných prvků. Předmětem řešení práce jsou alternativy vyztužení tenkých desek, které překrývají nosná žebra panelu. Jako náhrada klasického vyztužení je zde zkoušeno několik typů nekovových výztuží. Práce se zaměřuje na prověření parametrů navrhovaných typů výztuží z hlediska technologie, únosnosti a ekonomie.

Klíčová slova: prefabrikované prvky, nekovová výztuž, střešní panel, tenké desky, rozptýlená výztuž, kompozitní výztuž

Annotation

Title: Using of non metallic reinforcement like substitution polypropylene fibre in thin plates

Author: Lenka Kosíková

Department: Department of Construction Technology

Supervisor: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Supervisor's e-mail address: rostislav.sulc@fsv.cvut.cz

Abstract This bachelor's thesis focuses on the improvement of parameters of TT roof beams made of reinforced concrete. These panels are mainly use for roofing of wide-span halls or industrial buildings. Building of new halls from precast components is noticeably faster due to capability of roof panels to bridge the wide spans. This study was aimed at alternatives to reinforcement of thin slabs that overlap supporting ribs of the panel. As a replacement of classic reinforcement is tested several types of non-metallic reinforcement. The major objective of this study is to prove parameters of designed reinforcement regarding technology, load capacity and economics.

Keywords: prefabricated elements, non metallic reinforcement, roof panel, thin plates, scattered reinforcement, composite reinforcement

Obsah

1	Prefabrikované stropní panely ze železobetonu	9
1.1	Plné panely	9
1.2	Dutinové panely	10
1.3	Předpjaté panely	10
1.3.1	Předpjaté dutinové panely	11
1.3.2	Předpjaté panely průřezu TT	11
2	Použití nekovové výztuže	12
2.1	Porovnávání varianty vyztužení	13
2.1.1	Polypropylenová strukturální vlákna (stávající)	13
2.1.2	Basaltová mříž	17
2.1.3	Rohož ze skelných vláken	19
3	Řešená problematika	22
3.1	Současná podoba vyráběných prvků	22
3.1.1	Výztuž TT nosníků	23
3.1.2	Beton TT nosníků	24
3.1.3	Technologie výroby střešních nosníků TT	24
3.2	Řešený problém s tenkými deskami	24
4	Provádění zkoušek	26
4.1	Příprava vzorků	29
4.2	Příprava zkoušek	32
4.3	Průběh zkoušek	33
4.3.1	Zkušební vzorky VL - Beton vyztužený vlákny	34
4.3.2	Zkušební vzorky BS - Beton vyztužený basaltovou kompozitní mříží	39
4.3.3	Zkušební vzorky SV - Beton vyztužený sklovláknitou sítí	45
5	Cenové srovnání variant vyztužení	50
5.1	Původní cena prvku	50
5.2	Ceny jednotlivých typů vyztužení	51
5.2.1	Varianta 1 - polypropylenová vlákna - původní	51
5.2.2	Varianta 2 - basatová mříž, distančníky Mates	52

5.2.3	Varianta 3 - sklovláknitá síť, distančníky Spacers	53
5.3	Shrnutí cenové bilance typů vyztužení	54
6	Výsledné porovnání variant vyztužení	56
7	Závěr	58
Seznam obrázků		60
Seznam tabulek		62
Seznam příloh		I
A	Výkres tvaru zkušební desky	II
B	Výkres formy zkušební desky	IV
C	Výkres zkušebního stolu	VI

Úvod

Prvky sloužící k zastřešení objektů mají primárně za úkol chránit vnitřní prostory objektu před povětrností. Ze statického hlediska musí přenést nejen vlastní váhu, ale i zatížení, které způsobuje vnější povětrnost, či lidský faktor. Možností, jak zastřešit objekt je nespočetně mnoho. Závisí především na povaze zastřešovaného objektu. Ve své práci se zaměřím na zastřešení halových objektů o velkých rozponech, konkrétně na betonové střešní panely typu TT. Nosným prvkem těchto panelů jsou železobetonová předpínaná žebra, která jsou překryta slabou betonovou deskou. Tyto slabé desky přenášejí zatížení od zmíněné povětrnosti, a v době montáže i od lidského faktoru. Způsob jejich vyztužování a porovnání těchto variant bude náplní mé práce.

Cíle práce

Práce je zaměřena na problematiku předpjatých střešních panelů typu TT, konkrétně na slabé desky překrývající nosná žebra. Tloušťka těchto desek se obvykle pohybuje v rozmezí 60 - 150 mm, a vyztužují se ocelovými sítěmi. Má práce se zaměřuje na krycí desky s tloušťkou menší než 60 mm, kde již není možné zajistit krytí ocelové výztuže (riziko vzniku koroze). Možným řešením této problematiky by mělo být nahrazení klasické ocelové výztuže výztuží nekovovou.

V současné době je tento typ tenkých desek vyztužován pomocí polypropylenových vláken. Cílem práce je sestavení podkladů pro porovnání možných variant substituce tohoto vyztužení dalšími typy nekovových výztuží.

Součástí práce bude:

- seznámení s porovnávanými metodami vyztužení tenkých desek
- technologie výroby s použitím nových způsobů vyztužování
- výroba a zkoušky vzorků s různými druhy vyztužení
- ekonomická bilance prvků
- celkové porovnání variant z hlediska mechanických vlastností, technologické náročnosti a ekonomického zhodnocení

Kapitola 1

Prefabrikované stropní panely ze železobetonu

Výroba prvků ze železobetonu formou prefabrikace je známá již více než 150 let. Jejím zavedením bylo docíleno zefektivnění a urychlení výstavby hlavně v 70. letech minulého století. Prvky vyrobené ve výrobním závodu disponují vyšší kvalitou provedení, oproti prvkům monolitických. Důvodem vyšší kvality je možnost dostatečné kontroly technologie a sledování okolního prostředí. Použití prefabrikace je výhodné hlavně u prvků s minimálními rozměrovou obměnou, kterými stropní panely rozhodně jsou.

Výrobou stropních panelů se v dnešní době zabývá většina firem zaměřujících se na prefabrikaci. Prvky o stejném tvaru průřezu jsou vyráběny v různých délkách dle přání investora. Nemění se technologie výroby, způsob přepravy ani manipulace, čímž se proces výstavby značně urychluje.

Rozlišujeme základními typy prefabrikovaných stropních prvků:

- plné panely
- dutinové panely
- předpjaté panely (dále dělíme na dutinové a tvaru TT)

1.1 Plné panely

Tento typ panelů je nejjednodušším provedením stropních prvků vyráběných prefabrikací. Prvky nejsou nijak vylehčené, vzhledem ke své vlastní váze mohou být používány pouze pro malá rozpětí. Obvykle se jedná o jednosměrně pnuté desky obdélníkového tvaru. Někdy je možné setkat se i s prvky čtvercovými, ty jsou pnuté v obou směrech.

Tloušťka panelů se pohybuje v rozmezí od 65 - 160 mm, v závislosti na umístění a zatížení prvku. Skladebné šířky panelů jsou obvykle 1 200 mm. Panely mají průřez lichoběžníku, spojují se na sraz. Do spáry vzniklé sražením zkosených hran panelu se vkládá zálivková výztuž a spára se zmonolitní.

Tyto jednoduché panely je možné najít v nabídce téměř každé výroby prefabrikátů, a to v různých provedení. Plnostěné stropní panely o tloušťkách 80, 100 a 160 mm lze najít například v sortimentu firmy PREFA ŽATEC s.r.o., či jihlavské firmy Rieder Beton, spol. s r.o.

1.2 Dutinové panely

Dutinové panely jsou oproti předešlé variantě vylehčeny formou dutin kruhového průřezu. Tyto dutiny snižují hmotnost prvku, a zároveň zvyšují jeho únosnost při stejné délce prvku. Vytvořením dutin vznikají slabá žebírka, ve kterých probíhá nosná výztuž.

Tloušťka panelů se pohybuje v rozmezí mezi 140 - 250 mm, v závislosti na umístění a zatížení prvku. Spojování prvků pomocí zálivkové výztuže a zmonolitnění je stejné jako v předchozím případě.

Panely jsou běžně k dostání v prodejnách stavebnin. Jedním z výrobců nabízející tyto panely pod obchodním názvem „Alidal“, je například firma Dobiáš spol. s.r.o.

1.3 Předpjaté panely

Posledním z používaných typů prefabrikovaných panelů jsou panely předpjaté. Pomocí předpětí disponují prvky vysokou únosností, díky níž mohou překlenout i velká rozpětí. Ve stavbách tak vzniká volný prostor bez vnitřních podpor s rovným podhledem. Tento typ panelů je vzhledem ke svým vlastnostem nejčastěji používaným typem zastřešení nejen u průmyslových staveb. Omezujícím faktorem pro výslednou velikost těchto prvků se tak stává pouze velikost výrobní linky a možnost přepravy.

Předpjaté panely se obecně vyskytují v provedení:

- dutinové panely
- panely průřezu TT

1.3.1 Předpjaté dutinové panely

Tento typ panelů je znám nejčastěji pod obchodním názvem „Spiroll”, který převzala již velká většina firem, které tyto prvky vyrábějí. Tvar panelů je obdobný jako u již zmíněných dutinových panelů, ale výztuž procházející nosnými žebry je předepjatá. Vylehčený prvek, do něhož je vnášeno předpětí zvyšující jeho únosnost, tak dokáže překlenout rozpětí až 18 m. Tloušťka prvků se pohybuje v rozmezí od 200-500 mm. Panely se vyrábějí v modulu 1200 mm. Vzájemné spojování panelů se provádí pomocí zálivkové výztuže a následného zmonolitnění. Panely ve svém sortimentu nabízí například pražská firma PREFA PRAHA a.s.

1.3.2 Předpjaté panely průřezu TT

Posledním typem prefabrikovaných panelů jsou stropní panely průřezu dvojitého T. Způsobů tvarového provedení stropů tohoto typu je velké množství. Obecně se jedná o dvě nosná předepjatá žebra, která jsou překryta deskou vyztuženou ocelovými sítěmi. Deska je na obou stranách vykonzolována za nosná žebra v libovolné délce. Přesný tvar a rozměry prvků se napříč výrobci liší, tvarové varianty jsou však velice podobné.

Panely jsou obvykle vysoké 450-750 mm, v závislosti na zastropovaném rozponu. Tento typ panelů umožňuje překlenout rozpětí 24 m, výjimečně až 32 m. Vzniká tak volný prostor bez vnitřních podpor. Nevýhodou těchto panelů je nerovný podhled. Z tohoto důvodu jsou panely převážně používány pro průmyslovou halovou výstavbu, kde je kladen požadavek na volný vnitřní prostor, a nerovný podhled není překážkou. Výrobu a distribuci střešních panelů TT nabízí například firma MABA Prefa spol. s.r.o., či pražská firma KŠ PREFA.

Kapitola 2

Použití nekovové výztuže

Použití betonu vyztužovaného pomocí betonářské oceli, klasického železobetonu, je známo již od druhé poloviny 19. století. Vysokou pevnost, odolnost, dostupnost a řadu dalších nenahraditelných vlastností však stále doplňuje i řada vlastností negativních. Výztuž je těžká, při vyvazování složitějších prvků je práce s ní značně náročná. Jedním z hlavních problémů ocelové výztuže, který snižuje celkovou pevnost tohoto materiálu je koroze. Jev zapříčiněný vlhkostí, který při nedostatečném krytí, či narušení krycí vrstvy betonu způsobuje pomalé zmenšování účinného průřezu výztuže. Snaha o pokrytí zmíněných nedostatků ocelové výztuže vedla k úvaze nad možností náhrady jiným materiálem eliminujícím vznik těchto problémů. Pro tyto účely se začala používat výztuž nekovová.

Pojmem nekovová výztuž lze popsat velké množství výztužných materiálů a jejich kombinací. Tento typ výztuže lze najít v různých provedeních. Nejčastěji jako rozptýlená vlákna, tyče a z nich spojené mřížky, či výztužné sítě. Pro jejich výrobu jsou nejčastěji používána vlákna skelná, aramidová (kevlarová), čedičová (basaltová), či uhlíková. Pojivem spojujícím vlákna do tvarů výztužných tyčí či sítí jsou použity pryskyřice. Hlavním úkolem pryskyřic je přenášení zatížení působícího na výztužný prvek do nosných vláken. Používají se pryskyřice polyesterové, vinylesterové či epoxidové. Spojením vlákna a pryskyřice vznikají kompozitní prvky tzv. Fibre Reinforced Plastics (FRP) výztuže. Materiály používané pro výrobu těchto prvků disponují svojí vysokou pevností, nízkou hmotností, odolností proti korozi i vysokým teplotám. Pro svou magnetickou netečnost a odolnost vůči bludným proudům vyhovují použití v nemocničních zařízeních. Nevýhodou oproti klasické ocelové výztuži je rozdílná teplotní roztažnost těchto materiálů a betonu. Důsledkem toho mohou při oteplování materiálu s nekovovou výztuží vznikat problémy s nesoudržností betonu a výztuže. [2]

2.1 Porovnáváné varianty vyztužení

Pro porovnání se stávajícím typem vyztužení byly vybrány basaltové mříže a sklovláknité sítě od příslušných výrobců. Tyto typy výztuže byly voleny nejen z hlediska formy provedení, tedy spojení do výztužné mříže, ale i pro svojí vysokou pevnost a nízkou hmotnost.

2.1.1 Polypropylenová strukturální vlákna (stávající)

První z variant porovnávaných typů nekovových výztuží jsou momentálně používaná polypropylenová vlákna. Vlákna jsou vmíchávána pouze do betonu sloužícího pro zmonolitnění řešené slabé desky s vydatností 5 kg/m^3 , nikoli pro celý prvek.

2.1.1.1 Vyztužování vláken

Obecný název kategorie vláknobetonu zahrnuje vzhledem k typu použitých vláken velké množství takto využitelných materiálů. Vlákna v betonu se nejčastěji používají jako prvek vylepšující vlastnosti betonových výrobků vzhledem k jeho pevnosti v tahu. Prvky s použitím vláken se tak stávají duktilními. Zamezují vzniku smršťovacích i mikroskopických trhlin vznikajících průhybem prvku. Touto schopností vlákna zamezují proniknutí vlhkosti do konstrukce a tak eliminují vznik koroze u hlavní výztuže. Zlepšují se mechanické vlastnosti hotového prvku, který je odolnější vůči ohrusu a dalším mechanickým poškozením. Použití syntetických vláken také zlepšuje požární odolnost vyrobeného prvku. Vlákna v betonu zvyšují odolnost čerstvého betonu proti segregaci a omezují krvácení betonu.

Materiály používané pro výrobu vláken jsou voleny především s přihlédnutím k následnému využití betonové směsi. Vlákna polymerová jsou primárně volena pro zamezení vzniku smršťovacích trhlin, či pro zlepšení tahových parametrů betonu. Naopak vlákna ocelová jsou vhodná převážně pro vysoce zatížené betony, jako jsou například průmyslové podlahy.

Obecné rozdělení vláken dle materiálu:

1. polymerová vlákna
2. ocelová vlákna
3. skelná vlákna
4. vlákna přírodního původu
5. ostatní

Polymerová vlákna Tento typ vláken dělíme podle složení:

- polypropylenová vlákna
- polyethylenová vlákna
- polyesterová vlákna
- nylonová vlákna
- polyakrylátová vlákna
- PVA
- různé směsi z výše uvedených

Dále dělíme podle tloušťky jednotlivých vláken:

- Třída Ia: Mikrovlákná s průměrem $\leq 0,30\text{ mm}$, jednovláknovitá (monofilamentická) - vlákna jsou jednotlivá bez seskupení do svazků



Obrázek 2.1: Monofilamentická vlákna [3]

- Třída Ib: Mikrovlákna s průměrem $\leq 0,30 \text{ mm}$, vláknitá (fibrilovaná) - vlákna jsou tvořena seskupením několika jemných vláken, vytvářejí jednotlivé svazky



Obrázek 2.2: Fibrilovaná vlákna [3]

- Třída II: Makrovlákna s průměrem $\geq 0,30 \text{ mm}$ - vlákna jsou znatelně masivnější než předchozí, pro lepší soudržnost s betonem bývají často profilovaná



Obrázek 2.3: Makrovlákna [3]

2.1.1.2 Materiál - polypropylenová vlákna BASF MasterFiber 230

V současné době je svrchní deska střešních panelů TT vyztužována pomocí vláken MasterFiber 230. Jedná se o polypropylenová vlákna dodávaná americkou firmou BASF zabývající se výrobou převážně stavební chemie. Vlákna jsou monofilamentická a vytvarovaná do strukturálních ohybů pro lepší ukotvení v cementové matrici. Vzhledem ke svému složení je vlákna možné aplikovat i pro použití do vysoce agresivního a korozivního prostředí. Jejich použití je všestranné, od použití pro prefabrikované prvky, přes monolitické stropní desky, až po průmyslové podlahy. Dávkování vláken je závislé na specifických požadavcích na konstrukci. Doporučené dávkování se pohybuje mezi $1,5 - 9 \text{ kg/m}^3$. [5]

materiál	100 % polypropylen (černý)
provedení	Monofilament
ekvivalentní průměr	0,75 mm
délka vlákna	30 mm
pevnost v tahu	338 MPa
protažení	15 – 25%
modul pružnosti	1 550 MPa
objemová hmotnost	0,88 – 0,92 g/cm ³

Tabulka 2.1: Technické údaje - Vlákna BASF MasterFiber 230 [5]

2.1.1.3 Technologie provádění

Příprava betonové směsi s použitím rozptýlené výztuže se odvíjí od typu použitých vláken. Snahou je docílit homogenní betonové směsi s dokonale rozmístěnými vlákny. Jedině tak můžeme počítat s požadovanými vlastnostmi tohoto typu betonu. Některá vlákna jsou již z výroby lubrikována speciálními látkami, které usnadňují jejich rozmíslení v betonové směsi.

Dávkování je závislé na typu použitých vláken a účelu zhotovované konstrukce. Maximální a minimální potřebné množství je udáno výrobcem. Přesné dávkování stanovuje statický výpočet, a určuje se v procentech objemu, či kg/m³. Zamísení vláken do betonové směsi se provádí přímo v betonárce. Hotovou směs poté dopraví autodomíchávač na stavbu. Často se používá i dávkování vláken přímo na stavbě, kdy se do betonu dopraveného v autodomíchávači přisypávají vlákna. Druhý ze zmíněných způsobů výrobci vláken technologicky nedoporučují kvůli nedostatečnému promísení vláken v betonu (autodomíchávače nemají potřebný výkon jako míchačky v betonárnkách). Přidání vláken do betonu až na stavbě zapříčiní rozmíslení jednotlivých složek betonu z důvodu nepřiměřeně dlouhé doby proměšování. Některé z nejjemnějších typů polymerových vláken často doporučují výrobci zamísit do suché směsi složek betonu, před přidáním záměsové vody, přísad a příměsí.

Přibližná doba promísení vláken do betonové směsi je 1 min/m³ betonu. Špatným promísením vláken mohou v betonu vznikat tzv. „suší ježci“, což je jev, který vzniká nahromaděním vláken na jednom místě. Tento problém může vzniknout i tehdy, pokud dávku vláken nesypeme do směsi průběžně, ale najednou. Dalším jevem vznikajícím špatnou technologií výroby jsou tzv. „mokří ježci“. Ti vznikají v betonech s velkou frakcí kameniva, nebo dlouhými tenkými výztužnými vlákny. Jde o jev, kdy vlákna s kamenivem vytvoří smotek, ve kterém se odděluje cementový gel.

Vláknobetony, jsou-li kvalitně provedeny, v konečném důsledku fungují jako homogenní materiál, který má oproti klasickému betonu znatelně vyšší pev-

nost v tahu. Vzhledem k technologii ukládání betonů a jejich ošetřování tedy platí obecné zásady jako u běžných betonů (neukládat beton z vysoké výšky, chránit před nízkými a vysokými teplotami, bránit rozmísení složek vlivem nadměrné manipulace, apod.). [6]

2.1.2 Basaltová mříž

Významnou skupinu nekovových výztuží, která je v dnešní době jednou z nejvíce využívaných, jsou kompozitní výztužné prvky FRP. Jak již bylo nastíněno v úvodní kapitole o použití nekovových výztuží (viz kapitola **2 Použití nekovové výztuže**), jedná se o tyče vyráběné z nemetalických vláken spojované pojivem z pryskyřic. Proces výroby těchto výztužných prvků se nazývá pultruze. Jedná se o proces kontinuální výroby prutů, které vznikají pojením anorganických vláken pryskyřicí. Po vytvrzení jsou na výrobní lince děleny na příslušné délky dle účelu následného využití, nebo navíjeny na svitky. Z tyčí malých průměrů se poté bodovým lepením technickým plastem vyrábějí výztužné sítě. Tyče se vyrábějí od průměru 2 mm až do průměru 40 mm, ve výjimečných případech i více. Nevýhodou těchto výztuží je nutnost naohýbat výztuž již ve stádiu výroby - dříve než dojde k jejich vytvrzení. Dodatečné tvarování výztužných tyčí vyšších průměrů po vytvrzení pryskyřic již není možné. Výztužné mříže, kde jsou použity pruty menších průměrů ohýbat částečně lze. Oproti výztužným sítím z ocelových prutů jsou však sítě pružné a nedrží požadovaný tvar.

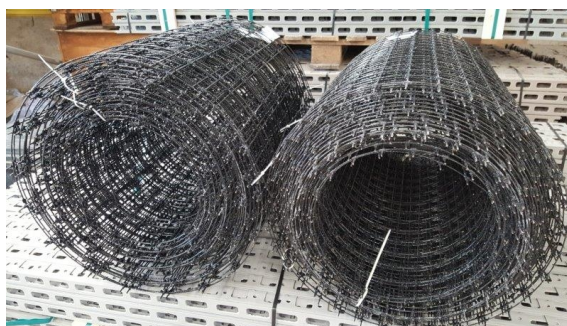
Pro výrobu kompozitních nekovových výztužných tyčí (CNMRB - Composite nonmetallic reinforced bar) používáme vlákna:

- skleněná (GNMRB - Glass nonmetallic reinforced bar)
- čedičová (BNMRG - Basalt nonmetallic reinforced bar)
- aramidová
- uhlíková
- kombinace uhlíkových a skelných vláken
- ostatní vlákna a jejich kombinace

Mechanické vlastnosti FRP výztuží se liší vzhledem k typu použitých vláken i pojiv. Obecně se pevnost kompozitů pohybuje v rozmezí mezi 550 - 2 000 MPa, s tažností mezi 1 - 4 %. Prvky z těchto materiálů vykazují oproti běžné ocelové výztuži jednu velkou nevýhodu - křehký lom. Výhodou nekovové výtuže je ovšem nulová tepelná vodivost a tím zamezení vzniku tepelných mostů. [8, 9]

2.1.2.1 Materiál - basaltová mříž ROCKMESH

Jako druhá varianta možnosti vyztužení byl zvolen materiál zastupující skupinu kompozitních FRP výztuží. Jedná se o basaltové (čedičové) výztužné sítě ROCKMESH, které dodává česká firma Želex. Firma se zabývá dodávkou speciálních prvků a nanotechnologie pro stavebnictví již od roku 2000. Sítě jsou tvořeny čedičovými pruty ROCKBAR o průměru 2,2 mm, které jsou bodově propojovány do sítí o velikosti oka 50x50 mm. Povrch čedičových prutů je již z výroby opatřen profilací, jakou známe u běžné ocelové výztuže. Tím je docíleno lepší soudržnosti výztuže a betonu. Materiál, ze kterého jsou sítě vyráběny je až třikrát pevnější než ocel a až sedmkrát lehčí. Výztuž je dodávána v návinech o šíři 0,8 m a délce až 30 m. [10]



Obrázek 2.4: Kompozitní čedičová síť ROCKMESH Ø2,2 mm, 50x50 mm [10]

Parametry výztužných sítí ROCKMESH jsou uvedeny v tabulce:

průměr prutu	2,2 mm
velikost oka	50x50 mm
tažnost	2,5 %
pevnost v tahu	1 550 MPa
plošná hmotnost	360 g/m ²
objemová hmotnost	1,9 g/m ³
tepelná vodivost	0,46 W/m.K
modul pružnosti	70 000 MPa

Tabulka 2.2: Technické údaje - ROCKMESH Ø2,2 mm, 50x50 mm [8]

2.1.2.2 Technologie provádění

Vyztužování pomocí basaltových mříží se provádí jednodušeji než vyztužování ocelovými sítěmi. Sítě nekovové výztuže jsou znatelně lehčí než výztuž ocelová, a práce s nimi se oproti klasickým kari sítím výrazně urychluje. Stejně jako u běžných ocelových sítí se zajišťuje umístění výztuže distančníky. Vzájemný přesah sítí doporučuje výrobce minimálně o jedno oko výztužné sítě. Mříže se

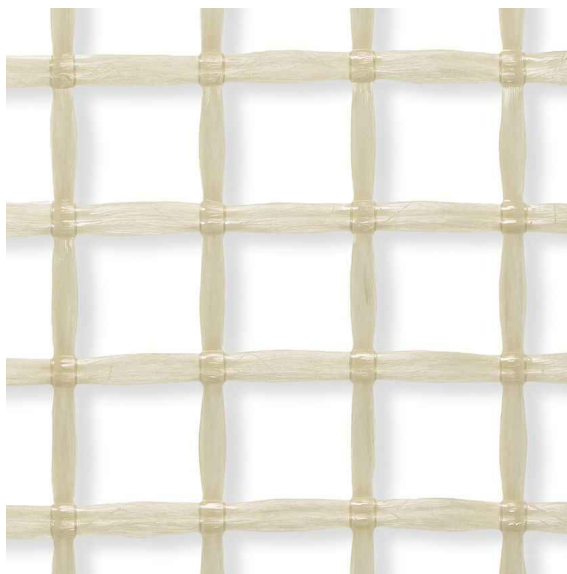
na stavbu dopravují ve svitcích s návínem až 30 m, tím se snižuje četnost stykování sítí pomocí přesahů jednotlivých pruhů. Délkou návínu svitku se však znatelně šetří množství materiálu, které se spotřebuje na přesahy a prořez. Nevýhodou použití těchto výztuží je nutné bodové připevňování pomocí drátů. Sítě jsou velmi lehké a při umisťování by docházelo k posunům v bednění.

2.1.3 Rohož ze skelných vláken

Využití skelných vláken ve stavitelství je již řadu let známé v mnoha různých provedeních. Dnes jsou používána ve formě jednotlivých vláken různé délky a tloušťky přimíchávaných do betonů, kde obecně zlepšují vlastnosti výsledného prvku. Dalším známým způsobem využití skleněných vláken jsou klasické výztužné sítě, označovány obvykle jako „perlinky”. Tyto sítě ztužují souvrství kontaktních zateplovacích systémů, kde zamezují vzniku smršťovacích trhlin a slouží jako výztuž souvrství. Skelná vlákna ve formě netkaných textýlií se poté používají pro vyztužení souvrství podlah. Vzhledem k nízké tloušťce těchto tkanin, a jejich výborným vlastnostem mohou být používány pro cementové potěry již od 5 mm tloušťky. V neposlední řadě jsou výztužné skelné rohože, které svým tvarem a formou připomínají několikanásobně zvětšené již zmíněné perlinky. Tento materiál byl vzhledem ke svým výborným vlastnostem vybrán jako další varianta vyztužení pro řešené stropní panely TT.

2.1.3.1 Materiál - sklovláknité výztužné sítě Solidian GRID

Jako další alternativa vyztužení svrchní desky střešních panelů TT byly vybrány výztužné sítě firmy Solidian sídlící v německém městě Albstadt. Firma se zabývá výrobou výztužných sítí ze sklených vláken s pojivem z epoxidových pryskyřic. Jelikož se jedná o druh nekovové výztuže, jsou tyto sítě odolné proti korozi. S ohledem na použitý materiál velmi dobře odolávají v alkalickém prostředí i prostředí ohrožovaném chloridy. Vzhledem k těmto vlastnostem se jedná o ideální materiál pro prvky jako jsou mostní konstrukce, prvky v okolí silnic, či prostředí v blízkosti mořské vody.



Obrázek 2.5: Výztužná síť Solidian GRID Q97/97 - AAE - 38 [7]

Materiál vyniká vysokou pevností v tahu. U betonových prvků vyztužených těmito rohožemi hodnota pevnosti v tahu dosahovala až 3 N/mm^2 . Pevnostní vlastnosti tohoto materiálu dosahují pěti až šestinásobku pevnosti klasického železobetonu. Kombinace vlastností, jako je odolnost proti korozi, vysoká pevnost a flexibilita výztuže napomáhá k možnosti výroby velice tenkých a detailních prvků, při zachování požadované únosnosti prvku.

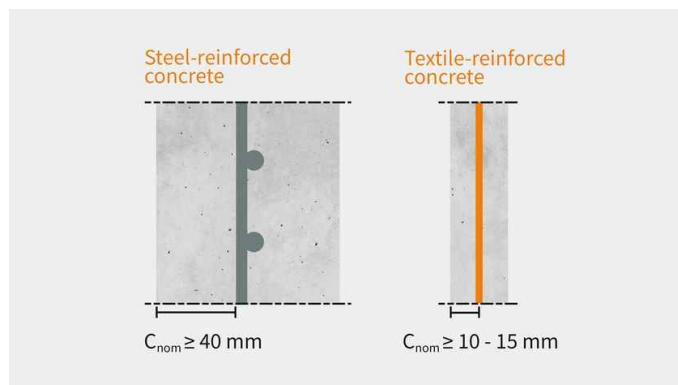
materiál	AR - glass
pojivo	epoxidová pryskyřice
rozměr sítě	5x1,2 m
velikost oka	38 mm
průřez pramenu	$3,68 \text{ mm}^2$
průřez sítě	$97 \text{ mm}^2/\text{m}$
pevnost v tahu	1 550 MPa
plošná hmotnost	$1 050 \text{ g/m}^2$
modul pružnosti	72 000 MPa

Tabulka 2.3: Technické údaje - Solidian GRID Q97/97 - AAE - 38 [8]

2.1.3.2 Technologie provádění

Výroba betonových prvků vyztužených skelnými rohožemi se provádí obdobně jako při vyztužování ocelovými kari sítěmi. Rohože se ukládají do bednění, a jejich umístění v betonovém prvku zajišťují distančníky. Výhodou použití vyztužných rohoží je srovnatelná objemová hmotnost rohoží a betonu. Objemová hmotnost sklených vláken se pohybuje v rozmezí mezi $2 400 - 2 800 \text{ kg/m}^3$. Díky této vlastnosti se nemusí řešit problematické jevy jako například vyplavávání výztuže k hornímu líci prvku těsně po zmonolitnění čerstvým betonem. Problematickými

se stávají malé otvory ve výztuži. Oko výztuže má pouhých 38 mm, mohou tedy vznikat problémy s protečením betonu skrz rohož. Použitá betonová směs tak musí být svou konzistencí přizpůsobena pro použití tohoto typu výztuže, aby došlo k dostatečnému protečení betonu skrz výztužnou síť.



Obrázek 2.6: Porovnání hodnot krytí u běžné výztuže a výztužných sítí Solidian [7]

Kapitola 3

Řešená problematika

3.1 Současná podoba vyráběných prvků

Problematika tenkých desek byla aplikována na předpínané střešní panely typu TT. Průřez panelu je tvořen dvěma předpínanými žebry, které překrývá slabá betonová deska vyztužená vlákny. Řešené prvky jsou nabízeny jako součást systému HalaSystem, které najdeme v sortimentu pražské firmy KŠ PREFA. Zmíněné panely posloužily pro aplikaci řešené problematiky. Jedná se o ucelený stavebnicový systém, který se skládá ze svislých stěnových panelů a sedlových střešních nosníků typu TT. Prostor je zastřešován pomocí předpjatých stropních prvků, kterými je možno překlenout vzdálenost až 32 m. Stropní prvky jsou sedlové se sklonem 1:40 (což odpovídá sklonu cca $1,6^\circ$), tím je zajištěn bezpečný odvod dešťové vody z povrchu panelů. Díky možnosti zastřešení takto vysokých rozponů vzniká volný vnitřní prostor bez dalších podpor.



Obrázek 3.1: Střešní nosník TT [1]

Nosnou část střešního prvku tvoří předepjatá železobetonová žebra, která jsou kryta tenkou deskou tl. 20 mm. Deska je vyztužena speciální zakázkově vyráběnou svařovanou sítí vystupující ze spodního líce desky, kde tvoří tenká žebra

(viz obrázek **3.2 Střešní nosník TT - spodní pohled [1]**). Mezi oky svařované sítě vznikají pole o velikosti 470x320 mm, které jsou vyztužovány pouze pomocí polypropylenové vláknité výztuže. Nosníky jsou navrženy pro uložení na stěnové panely systému. Tyto nosníky je možné je upravit i pro uložení na průvlaky, či sloupy.



Obrázek 3.2: Střešní nosník TT - spodní pohled [1]

3.1.1 Výztuž TT nosníků

Pro výrobu střešních prvků je použita běžná ocel 10 505 (R), která je doplněna předpínacími lany Y 1860 S7 Relax. Lana vnášejí do prvku počáteční předpětí 1 200 MPa.



Obrázek 3.3: Vyztužení stropního panelu STT

Nosná žebra jsou vyztužena ocelí R20 a R10, smyková výztuž a ostatní prvky poté pruty R6, R8. Svrchní krycí deska je současně vyztužena zakázkově vyráběnou ocelovou svařovanou sítí v kombinaci s dovyztužením polypropylenovými vlákny.



Obrázek 3.4: Speciální svařovaná síť

3.1.2 Beton TT nosníků

Beton pro výrobu těchto prvků je vyráběn přímo v areálu prefy. Do bednění je dopravován badií přemisťovanou pomocí halového jeřábu. Vzhledem k výrobě prvků v prostorách zastřešené haly je pro návrh užíváno stupně vlivu prostředí XC1. Prvky jsou vyráběny z betonu C50/60. Pro zlepšení pevnostních vlastností betonu v místech tenké krycí desky je beton doplněn vlákny. Jedná se o polypropylenová strukturální vlákna BASF MasterFiber 230.

3.1.3 Technologie výroby střešních nosníků TT

Prvky se vyrábí jako předem předepínané panely formou prefabrikace. Betonáž je prováděna na speciálním stole s hydraulickým odbedňováním. Zmonolitnění výztuže probíhá ve dvou fázích. V první fázi se zmonolitní nosná žebra běžným betonem. Dále pro zmonolitnění tenké desky je používán beton s vlákny. Každý z vyráběných panelů je vyráběn dle vlastní projektové dokumentace na zakázku.

3.2 Řešený problém s tenkými deskami

Předmětem řešení jsou tenké desky překrývající nosná žebra panelu. V ploše těchto desek o tloušťce pouhých 2 cm probíhá zakázkově vyráběná ocelová síť tvořící rastr 500x610 mm vystupující ze spodního líce desky. Místa, kde neprobíhá výztuž jsou ztužena pouze pomocí rozptýlené výztuže tvořené polypropylenovými vlákny. Bylo uvažováno o náhradě stávajícího vyztužení tenkých desek STT panelů jiným typem nekovové výztuže. Substituce stávajícího způsobu vyztužení má zajistit zvýšení pevnosti v oblasti tenkých desek a ideálně i zlepšit požární vlastnosti prvku. Celkový přehled porovnávání parametřů u vybraných typů výztuže bude podkladem k rozhodování, zda-li nahradit stávající typ vyztužení těchto částí střešních panelů.

Pro posouzení vhodnosti použití nového způsobu vyztužování tenkých desek byla zvolena varianta výroby zkušebních prvků - částí konstrukce. Tento způsob byl volen s ohledem na zkoušené parametry a požadavky na konstrukci. Jedním z hlavních požadavků bylo zvýšení únosnosti tenkých desek, a to hlavně při samotné montáži prvků. Bylo tedy nutné zhotovit tvar zkušebního tělesa a tak co nejvhodněji nasimulovat zatížení zkoušené desky.

Výroba zkušebních vzorků byla prováděna ve výrobním závodě firmy KŠ PREFA, který se nachází ve městě Štětí nedaleko Roudnice nad Labem. Následné zkoušky byly prováděny v Kloknerově ústavu ČVUT. Po dobu výroby zkušebních vzorků mi bylo k dispozici několik pracovníků firmy KŠ PREFA. Odborný dohled po celou dobu provádění zkoušek zajišťoval přímo hlavní technolog firmy KŠ PREFA, a mentor mé práce pan Ing. Jan Marek. Více informací o přípravě vzorků, jejich zhotovování a následných zkouškách (viz kapitola **4 Provádění zkoušek**).

Kapitola 4

Provádění zkoušek

Pro optimální využití technických vlastností daného materiálu, a zároveň pro hospodárný návrh nové konstrukce jsou aplikovány zkoušky. Zkoušením betonových prvků a jejich složek v různých technologických fázích se docílí optimálního využití navrženého prvku. Materiály musí odolávat mechanickému namáhání nejen tahem, tlakem, krutem, stříhem a ohybem, ale i jejich vzájemným kombinacím. Zkoušený materiál tak musí disponovat vlastnostmi jako je pevnost, tvrdost, pružnost a tvárnost.

Jsou rozlišovány zkoušky průkazní, což jsou zkoušky prováděné u betonu před výrobou nové záměsi. Tyto zkoušky mají potvrdit navržené technické parametry betonové směsi. Dále jsou používané zkoušky ověřovací, které mají za úkol kontrolovat zda-li vlastnosti vyrobené směsi odpovídají požadovaným vlastnostem uvedeným v technickém listu daného druhu betonu. Dle charakteru zkoušky jsou rozlišovány zkoušky na destruktivní a nedestruktivní. [3]

Zkoušky vstupních materiálů

Pro ověření požadovaných parametrů použitých materiálů jsou v předem určených intervalech prováděny zkoušky. U betonové směsi se jedná o tzv. zkoušky konzistence, které zkoumají především optimální množství záměsové vody v betonové směsi. Parametry určující konzistenci jsou předepsány pro každou vyráběnou betonovou směs stejně tak, jako například pevnost výsledného betonu.

U výztuže jsou zkoumány a ověřovány hlavní parametry jako je pevnost, tvrdost či houževnatost.

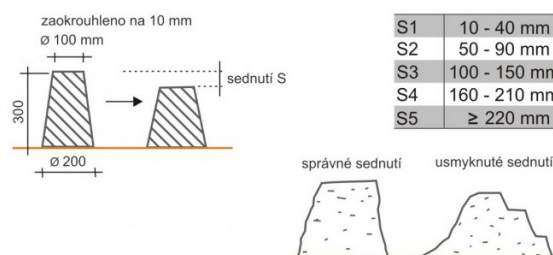
Čerstvý beton Pomineme-li zkoušky jednotlivých složek čerstvé betonové směsi (kamenivo, cement, voda, přísady a příměsi), první zkoušky se provádí u čerstvé betonové směsi. Jedná se o zkoušky, které jsou zaměřeny na zkoušení konzistence

čerstvého betonu.

Mezi tyto zkoušky patří:

- Sednutí kužele (Abrams)

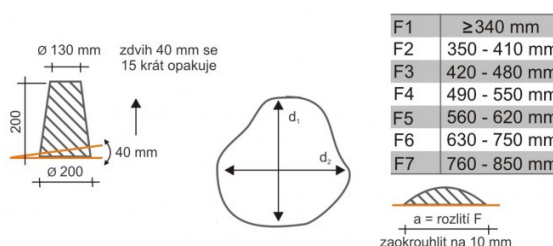
Forma tvaru kužele se umístí na navlhčenou podložku a připevní se pomocí příložek. Plní se třemi vrstvami zkoušené směsi, každá vrstva se zhutní 25 vpichy tyčí. Po 5 - 10 s se forma zvedne, a ihned se měří sednutí zkušebního kužele. Požadovaná hodnota sednutí **S** je uvedena v technickém listu objednaného betonu. [3]



Obrázek 4.1: Zkouška sednutím (Abrams) - Slump test [3]

- Rozlití

Pro tento typ zkoušky se používá podložka složená ze dvou desek spojených na jedné straně podélným pantem. Na navlhčenou horní desku se umístí forma tvaru komolého kužele, která se naplní dvěma zhutněnými vrstvami betonové směsi. Po sejmutí formy se horní deska nadzvedá a nechává padat celkem 15x. Po ukončení setřásání se měří rozměr rozlitého koláče na desce. Požadovaná hodnota rozlití **F** je uvedena v technickém listu objednaného betonu. [3]



Obrázek 4.2: Zkouška rozlitím [3]

- VeBe

Tento typ zkoušky je v jisté míře kombinací zkoušek přechozích. Na vibrační desku se umístí navlhčená válcová nádoba, a do ní je postavena forma tvaru komolého kužele. Tato forma se naplní betonovou směsí ve třech vrstvách, každá vrstva je zhutněna 25 vpichy tyčí. Po zarovnání je naplněná forma zdvihnuta a na beton se položí průhledná deska shodného poloměru jako je válcová nádoba. Poté se

spouští vibrační stůl a měří se doba, za kterou bude průhledná deska celým svým povrchem ležet na betonu. Výsledná hodnota zkoušky **V** určuje dobu rozlití v sekundách a je uvedena v technickém listu objednaného betonu.

- Stupeň zhutnění

Válcová nádoba se naplní po okraj betonovou směsí. Ke zhutnění se používá vibračního stolu či ponorného vibrátoru. Zhutnění se provádí dokud je patrné zmenšování objemu. Výsledkem zkoušky je hodnota stupně zhutnitelnosti **C** vypočtená z poklesu množství betonové směsi vlivem zhutnění.

Výztuž

- tahová zkouška

Nejrozšířenější zkouškou výztuže je zkouška tahová. Jde o zkoušku, kde je vzorek prutu upnut do hydraulického zkušebního stroje a zkouší se jeho pevnost v tahu. Výsledné hodnoty závisí na chemickém složení výztuže a její mikrostruktuře. Přístroj zaznamenává hodnoty napětí ve vztahu k deformaci vzorku. Výsledný graf je nazýván pracovním diagramem materiálu. Tento typ zkoušky je prováděn i u nekovových výztuží.

- zkouška vrubové houževnatosti

Zkouška bývá nazývána Charpyho zkouškou. Jedná se o zkoušku, kde je vzorek zkoušeného materiálu upnut do přístroje s kyvným kladivem, které odjištěním vzorek přerazí. Měří se množství energie potřebné k přeražení vzorku - hodnota nárazové energie. Tyto zkoušky se často používají pro zkoumání vlivu teploty na houževnatost vzorku.

- tvrdoměrné zkoušky

Je zkoumána odolnost materiálu proti vnikání cizího tělesa. Tvrdost materiálu obecně souvisí s pevností materiálu. Pomocí převodních tabulek a vztahů lze z tvrdosti materiálu odvodit jeho pevnost. Typů zkoušek je několik. Většinou jde o zkoušení tvrdosti vtlačováním diamantového tělíska o různém tvaru, nejčastěji jehlanu či kuželu.

Zkoušky zkušebních těles

Pro zkoušky průkazní, či ověřovací se používá zkoušení betonu v tlaku. Údaj určující pevnostní třídu betonu se skládá z pevnosti zkoušené na vzorcích krychlových (velikost hrany 15x15x15 cm), a válcových (průměr 15 cm, výška 30 cm).

Pro zkoušení reálně použitého betonu se poté používají pro zkoušení tělesa získána vývrty z konstrukce. Velikost těchto vzorků vychází z velikosti použitého kamene. Zkoušení vzorků je prováděno pomocí hydraulického lisu, kde jsou vzorky konstantně zatěžovány až do porušení.

V této bakalářské práci byly pro ověření požadovaných vlastností použity zkoušky pevnosti na zkušebních krychlich. Sestava třech kusů vzorků byla vyhotovena a odzkoušena pro každý z použitých typů nekovové výztuže.

4.1 Příprava vzorků

Pro následné zkoušky, které měly za úkol simulovat řešenou desku TT nosníku, byly vytvořeny vzorové panely (viz příloha **A Výkres tvaru zkušební desky**). Původní myšlenkou bylo vytvoření panelu o rozměru jednoho pole tenké desky, mezi pruty speciální kari výztuže. Vytvořený testovací vzorek byl identickou kopií jednoho pole tenké desky STT panelu (velikosti 500x610 mm). Součástí vzorku bylo i slabé žebírko tvořené pruty speciální kari sítě. Pro výrobu vzorků byla navržena forma (viz příloha **B Výkres formy zkušební desky**). Bednění bylo tvořeno kombinací bednicích desek WESTAG Phoenix Special tl.19 mm a ocelových výlisků používaných přímo ve formách na výrobu panelů STT. Celkem byly zhotoveny 3 kusy těchto forem - betonáž byla prováděna ve třech sadách.

Vzorky vyztužené PP vlákny Postup výroby prvního typu vzorků vyztuženého PP vlákny nebylo nutné nijak blíže specifikovat. Jedná se o vzorky vyrobené ze stávajícího materiálu, používaného pro výrobu STT panelů.



Obrázek 4.3: Zkušební panely č.1 - Beton C50/60 vyztužen PP vlákny

Vzorky vyztužené basaltovou mříží ROCKMESH Pro práci s basaltovými mřížemi bylo nutné zajistit krycí vrstvu výztuže. Jelikož se jedná o nekovovou výztuž nebylo nutno řešit tloušťku krycí vrstvy - výztuž nepodléhá korozi. Úkolem bylo zajistit takové krytí, aby výztužná síť držela ve spodní polovině průřezu desky, a zároveň, aby se distanční prvek do malé tloušťky desky vešel.

Distanční tělíska s krycí vrstvou menší než 15 mm nejsou standartně dostupná, v běžné praxi se téměř nepoužívají.

Bylo jednáno s pražskou firmou DIS-TECH, která ve svém sortimentu nabízí prvek Minifix zajišťující krytí 5 mm. V současnosti však tento prvek není v ČR k dostání. Bylo by nutné objednat minimálně 5 000 kusů ze zahraničí (vzorky nezasílají). Jelikož se jednalo o jediný prvek s tak malým krytím, bylo nutné upravit hodnotu krytí na 10 mm, a umístit tak výztužnou mříž do poloviny výšky průřezu. Prvky zajišťující krytí 10 mm dodala písecká firma Hüwa cz. Bohužel tyto prvky měly celkovou výšku větší než 2 cm, a do desky by se bez dodatečných úprav nevešly.



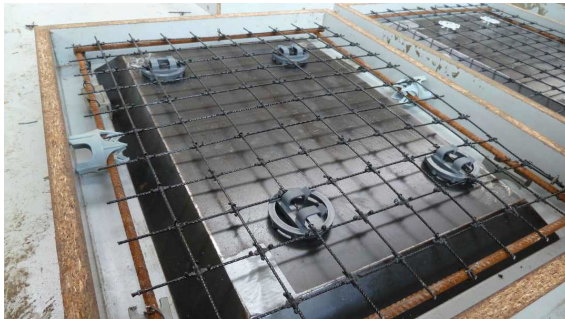
Obrázek 4.4: Distanční prvek firmy Hüwa cz - krytí 10 mm, celková výška 3 cm

Konečným distančním prvkem splňujícím požadavky se stal prvek „Mates” liberecké firmy BetonPlast s.r.o. zajišťující krytí 10 mm, s celkovou výškou prvku 18 mm.



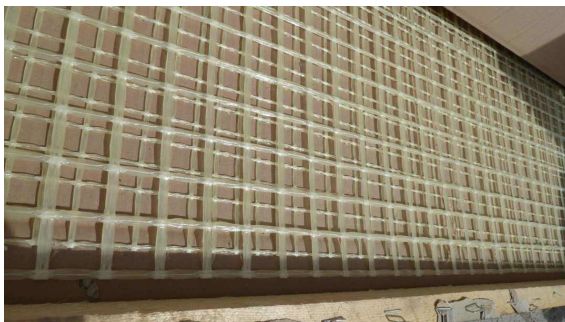
Obrázek 4.5: Distanční tělíska s krytím 10 mm - BetonPlast s.r.o. - Mates

Basaltová výztuž ROCKMESH byla pro zkušební účely poskytnuta od firmy Želex za 50% původní ceny. Příprava vzorků a manipulace s výztuží byla vzhledem k použitému typu výztuže snadná.



Obrázek 4.6: Zkušební panely č.2 - Beton C50/60 vyztužen basaltovou sítí ROCKMESH 50x50 mm, distančníky Mates 10 mm

Vzorky vyztužené sklovláknitou sítí Solidian GRID Obdobně jako při umisťování basaltových sítí bylo řešeno zajištění krycí vrstvy výztuže. Firma Solidian nabízí ve svém sortimentu distanční tělíska Spacers 10/10 zajišťující krycí výztuže 10 mm. Výztužné sítě byly poskytnuty pro zkoušky zdarma včetně distančních tělísek Spacers. Hrazena byla pouze doprava sítí z Německa.



Obrázek 4.7: Výztužné sítě Solidian GRID Q97/97 - AAE - 38

Práce se sítěmi byla díky nízké hmotnosti velice snadná, aplikace distančníků dodávaných přímo firmou Solidian funguje velmi dobře. Sklovláknité sítě jsou oproti sítím basaltovým znatelně tužší. Při aplikaci do vzorků dokázaly lépe držet tvar - nedocházelo k průhybu, či vyboulení sítě.



Obrázek 4.8: Zkušební panely č.3 - Beton C50/60 vyztužen sklovláknitou sítí Solidian GRID Q97/97 - AAE - 38, distančníky Spacers

4.2 Příprava zkoušek

Jednotlivé kazety (které byly pro zkoušky simulovány zkušebními panely), jsou u střešních panelů STT propojeny do souvislé desky. Zkouškami jednotlivých zkušebních těles tak nebylo možné jednoznačně nasimulovat identické silové podmínky, jaké působí na tento segment v celé konstrukci. Zkoušky byly naplánovány jako zatěžování desky centrickým zatížením s celoobvodovým podepřením.

Pro zajištění podepření zkušebních panelů po celém obvodu bylo nutné navrhnout testovací stand pro zkoušení. Byl navržen ocelový stůl svařovaný z ocelových válcovaných nosníků tvaru U a I (viz příloha **C Výkres zkušebního stolu**). Aby nedošlo v průběhu zkoušek k porušení obvodového žebra, byl panel po dobu zkoušky v místě styku se zkušebním stolem podložen gumovými pásy.



Obrázek 4.9: Ocelový zkušební stůl

4.3 Průběh zkoušek

Panely byly podrobeny zkoušení ve stáří 7 dní. Zkoušení v takto krátkém intervalu bylo zvoleno z důvodu dostatečného nasimulování reálných podmínek. Vzhledem k použitému betonu vyráběné panely STT dosahují minimální požadované pevnosti po sedmi dnech. Bylo tedy nutné nasimulovat tyto podmínky i na zkušebních tělesech. Zkoušením panelů v 7 denním stáří tak byly vzorky podrobeny zatížení v nejméně příznivých podmínkách.

Pro ověření pevnosti používané betonové směsi, byly zhotoveny zkušební kostky pro zkoušky tlakové pevnosti betonu. Kostky byly zkoušeny v týdenním stáří, stejně jako testované panely.

Zkoušení zkušebních panelů bylo prováděno v souladu s požadavky normy ČSN EN 1991 - 1 - 1: Zatížení konstrukcí [11], konkrétně částí pro užitná zatížení střech. Dle normy musí být střechy (zde střešní panely) schopné přenést zatížení 1,5 kN působící na ploše o velikosti 50x50 mm. Tento způsob zatěžování byl simulován pomocí ocelového tělíska zmiňované velikosti.

Vzorky byly podepřeny po svém obvodu gumovými podkládky a umístěny na zkušební ocelový stůl. Zatěžování bylo prováděno posunem zkušebního válce pomocí hydraulického lisu o maximálním možném zatížení 40 kN. Při zatěžování panelů docházelo v podepření ke stlačování gumových podkladek. V místě uložení segmentu na obvodový rám byl po dobu zkoušky měřen posun pomocí lineárního potenciometrického snímače polohy. Hodnoty naměřeného posunu byly ve výsledku odečteny, a tím byly neměřené hodnoty opraveny.



Obrázek 4.10: Zkušební sestava

4.3.1 Zkušební vzorky VL - Beton vyztužený vlákny

Prvním zkoušeným vzorkem byl stávající způsob vyztužení pomocí vláken. Zatěžování vzorku bylo z počátku prováděno rychlostí 0,01 mm/s, postupně byla rychlost navýšena na 0,02 mm/s. Již z průběhu a následně i z výsledků zkoušek bylo zřejmé, že byla pro vyztužení použita vláknitá výztuž. Porušení vzorku bylo pravidelné, trhliny se tvořily přesně diagonálně. Po vzniku prvních trhlín viditelných ze spodního líce vzorku začaly být zanedlouho patrné i trhliny z vrchní části. Po porušení vzorku bylo patrné, že stále vysokou míru zatížení přenášejí vlákna. Prvek i po porušení betonu byl stále schopen přenášet velkou míru zatížení.



Obrázek 4.11: Porušení panelu VL při zatížení - spodní pohled

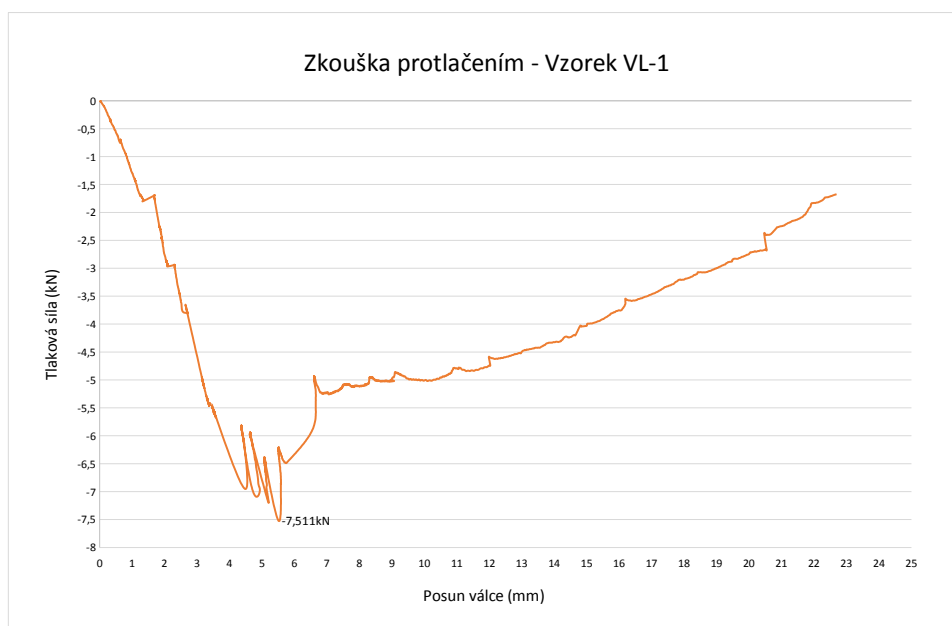
Pro ověření požadované pevnosti betonu v tlaku byly provedeny zkoušky pevnosti na betonových kostkách o hraně 15 cm. Vzorky byly vyrobeny z čerstvého betonu bez přidání vláken, pro možnost porovnání pevnosti vzorků s ostatními způsoby vyztužení. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v tabulce (viz tabulka 4.1 **Pevnost v tlaku - beton C50/60 - pro vzorky VL**).

	Hmotnost (kg)	Pevnost v tlaku (MPa)
1	2,339	54,4
2	2,322	54,9
3	2,331	54,5

Tabulka 4.1: Pevnost v tlaku - beton C50/60 - pro vzorky VL

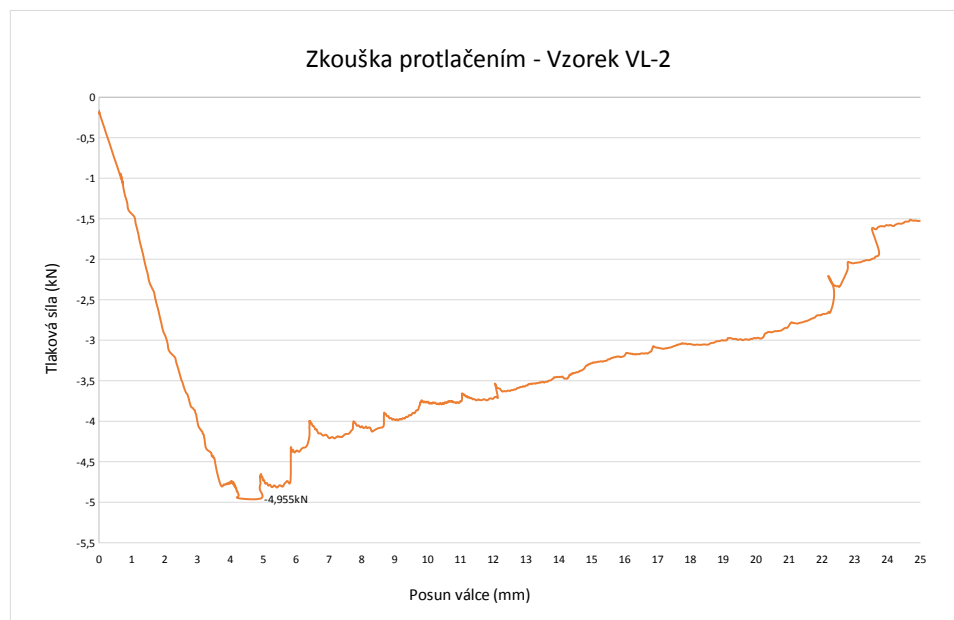
Vzorek VL-1 Prvním zkoušeným typem nekovové výztuže byl vzorek vyztužený polypropylenovými vlákny. Při zatěžování prvního ze zkoušených vzorků byla nastavena rychlost posunu na 0,005 mm/s. Nízká rychlost byla zvolena z důvodu vyzkoušení, jaké zatížení je vzorek schopen snést. Postupně byla zkouška zrychlena na rychlost 0,01 mm/s.

Z uvedeného grafu je patrné, že první malé vlasové trhliny na spodní části vzorku (viz obrázek 4.11 **Porušení panelu VL při zatížení - spodní pohled**) začaly vznikat pro zatížení cca 1,8 kN. Celková únosnost zkoušeného vzorku byla dosažena až při 7,5 kN. Již výsledkem první zkoušky bylo ověřeno, že desky vyztužené polypropylenovými vlákny, které se používají pro stávající podobu STT panelů firmy KŠ PREFA splňují normový požadavek pro únosnost střešní konstrukce a to 1,5 kN.



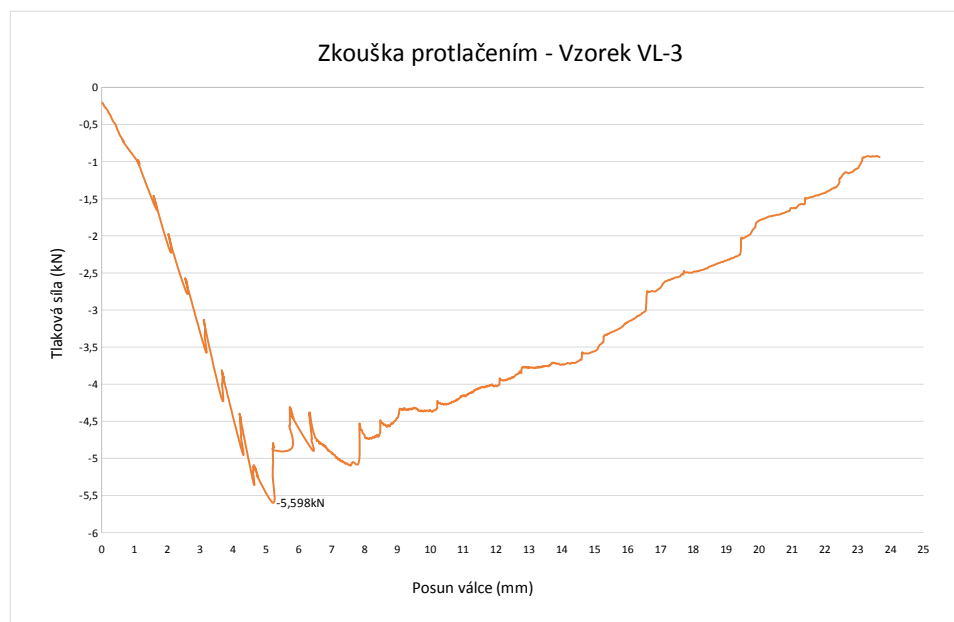
Obrázek 4.12: Graf průběhu zatěžování - vzorek VL-1

Vzorek VL-2 Druhý zkušební vzorek od počátku zatěžování vykazoval lepší vlastnosti než vzorek VL-1. Rychlost zatěžování vzorku byla nastavena obdobně jako v prvním případě na rychlost 0,01 mm/s. Od začátku zatěžování až po maximální únosnost prvku nebyly zaznamenány téměř žádné vlasové trhlinky ve spodní části panelu. Výsledná únosnost prvku však nebyla tak vysoká, jako u vzorku prvního. Bylo dosaženo konečné únosnosti 4,9 kN. V pravé větvi grafu je patrné, jak postupně vlivem zatěžování praskala jednotlivá vlákna výztuže ve vzniklé trhlině, a tím se snižovala celková únosnost zkoušeného vzorku.



Obrázek 4.13: Graf průběhu zatěžování - vzorek VL-2

Vzorek VL-3 Poslední ze zkoušených vzorků vyztužených vlákny se choval obdobně jako první vzorek. Rychlost zatěžování byla opět nastavena na 0,01 mm/s. Na levé větvi grafu je opět patrný vznik prvních trhlin na spodní části panelu. Výsledná únosnost zkoušené desky dosáhla 5,6 kN.



Obrázek 4.14: Graf průběhu zatěžování - vzorek VL-3

Shrnutí výsledků zkoušek panelů VL

Výsledky zkoušek provedených na panelech vyztužených pomocí polypropylenových vláken jsou shrnuty v tabulce (viz tabulka 4.2 **Výsledky měření vzorků VL**).

	Posouvající síla (kN)	Průhyb desky (mm)
Vzorek VL-1	7,511	5,496
Vzorek VL-2	4,955	4,911
Vzorek VL-3	5,598	5,212

Tabulka 4.2: Výsledky měření vzorků VL

Při porovnání průběhu provedené série zkoušených desek s rozptýlenou výztuží vykazují vzorky obdobné vlastnosti. Levá větev grafu je u všech vzorků přibližně lineárního průběhu s postupnými náznaky vzniku prvních vlasových trhlin. Zatěžování probíhá až do meze pevnosti betonu, kde dochází k přesunu zatížení do výztužných vláken. Po kolapsu betonové části se graf zvedá do pravé větve, kde se únosnost vzorku snižuje. V pravé části grafu je patrné postupné přelamování výztužných polypropylenových vláken a snižování únosti vzorku. Vzorky nebyly z praktického hlediska zatěžovány do úplného zničení - průběh grafu by se neměnil, pouze by došlo k úplnému rozlomení desky.

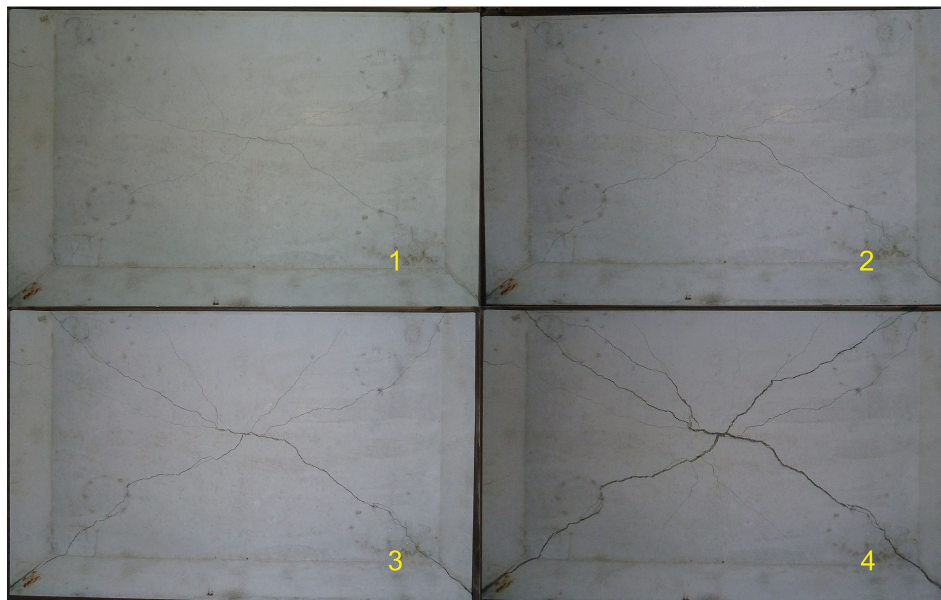


Obrázek 4.15: Deska VL po provedení zkoušky

4.3.2 Zkušební vzorky BS - Beton vyztužený basaltovou kompozitní mříží

Dalším ze zkoušených vzorků byly vzorky vyztuženy pomocí basaltových výztužných mříží. Rychlost zatěžování byla nastavena na 0,01 mm/s, po dosažení maximální hodnoty únosnosti byla rychlost zvýšena. Chování vzorků pozorované při jejich zatěžování bylo velmi podobné. Po vzniku trhlin na spodním líci desky

trvalo poměrně dlouho, než se objevily trhliny znatelné i na horní části desky. Výztuž dokázala dlouho odolávat a přenášet zatížení, než došlo ke konečnému kolapsu vzorku.



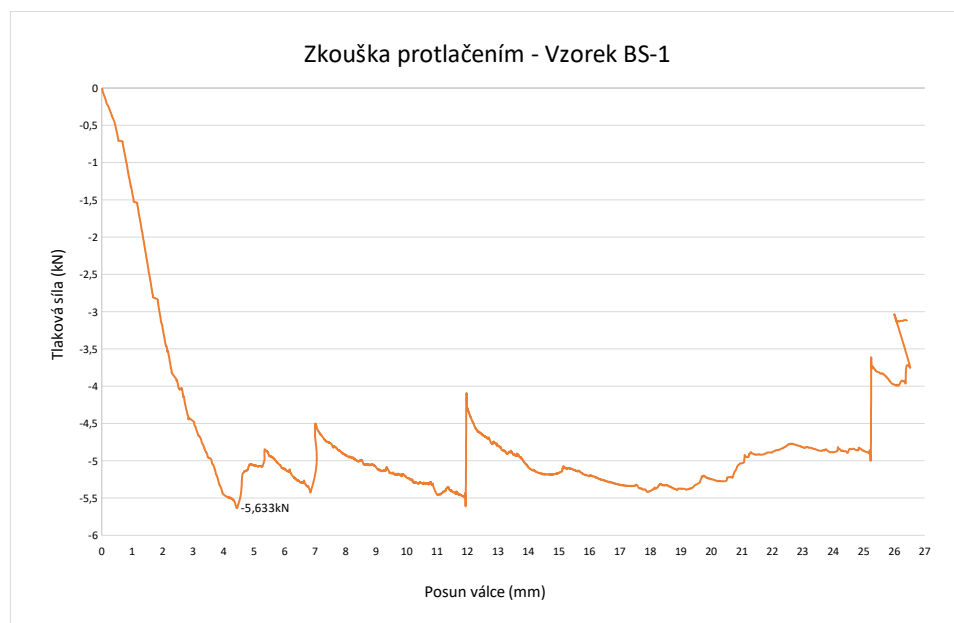
Obrázek 4.16: Porušení panelu BS při zatížení - spodní pohled

Pro ověření požadované pevnosti betonu v tlaku byly provedeny zkoušky pevnosti na betonových kostkách o hraně 15 cm. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v tabulce (viz tabulka **4.3 Pevnost v tlaku - beton C50/60 - pro vzorky BS**).

	Hmotnost (kg)	Pevnost v tlaku (MPa)
1	2,374	64,3
2	2,359	62,8
3	2,359	60,9

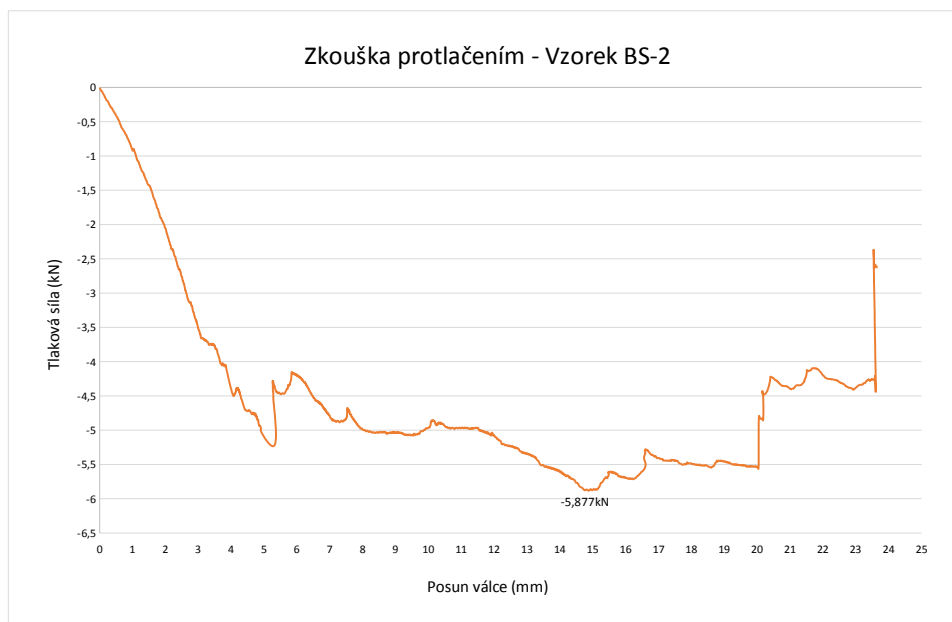
Tabulka 4.3: Pevnost v tlaku - beton C50/60 - pro vzorky BS

Vzorek BS-1 První zkoušený vzorek vyztužený basaltovou výztuží dokázal bez větších trhlin odolávat zatížení až do maximální hodnoty 5,633 kN. Z grafu je patrné, že po překročení pevnosti betonu převzala zatížení výztužná síť, a nadále dokázala přenášet zatížení kolem 5 kN. Skokově je v grafu viditelné, jak se postupně porušovaly jednotlivé pruty výztužné sítě až do celkového kolapsu vzorku.



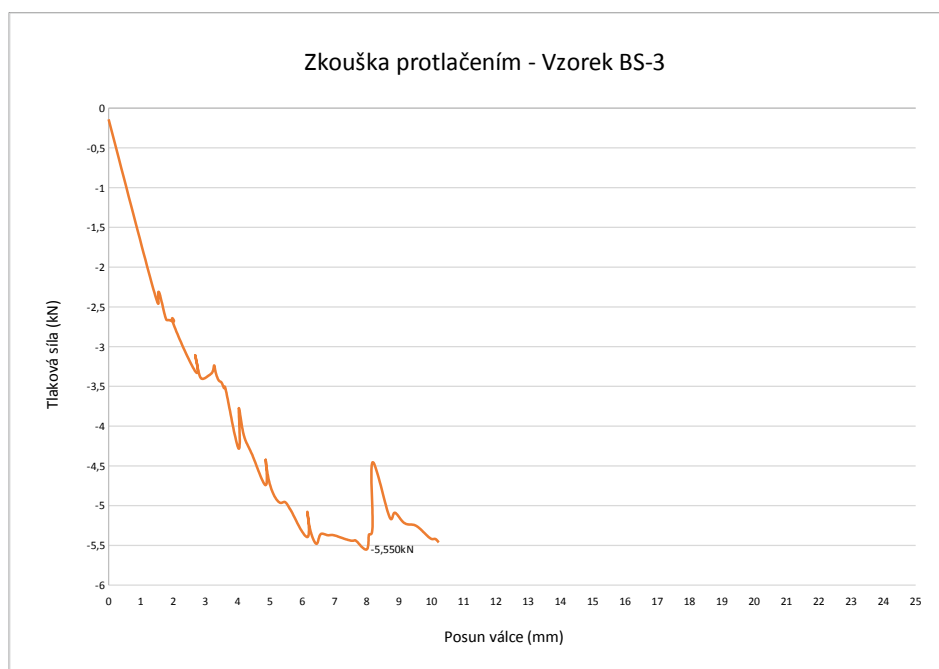
Obrázek 4.17: Graf průběhu zatěžování - vzorek BS-1

Vzorek BS-2 Druhý zkoušený vzorek vykazoval velmi podobné vlastnosti jako první zkoušený prvek. Oproti prvnímu vzorku zde nejsou tolik znatelná místa přerušení jednotlivých prutů výztuže a následné zpevnění. Nejvyšší únosnosti bylo dosaženo až po vzniku prvních větších trhlin a poměrně dlouhém zatěžování. V grafu je tak znatelná vysoká únosnost výztužných sítí.



Obrázek 4.18: Graf průběhu zatěžování - vzorek BS-2

Vzorek BS-3 Zkoušení posledního vzorku z této série doprovázely komplikace. Po dosažení maximální únosnosti betonu, a tím i vzorku, došlo k chybě měřicího softwaru a ukončení zkoušky. Následkem toho bylo přerušeno zapisování dat a jediným výstupem ze zkoušky byl pouze graf. Grafické znázornění je přibližně zpracováno z fotografické dokumentace. Vzhledem k chování předchozích dvou zkoušených vzorků lze předpokládat, že pravá část grafu bude mít obdobný průběh. Předpokládaným průběhem grafu je tedy poměrně dlouhá, vodorovně orientovaná křivka se skokovými hodnotami naznačujícími porušování jednotlivých prutů výztužné sítě.



Obrázek 4.19: Graf průběhu zatěžování - vzorek BS-3

Shrnutí výsledků zkoušek panelů BS

Výsledky zkoušek provedených na panelech vyztužených pomocí basaltových výztužných mříží jsou shrnuty v tabulce (viz tabulka 4.4 **Výsledky měření vzorků BS**).

	Posouvající síla (kN)	Průhyb desky (mm)
Vzorek BS-1	5,633	4,444
Vzorek BS-2	5,881	14,864
Vzorek BS-3	5,598	8,002

Tabulka 4.4: Výsledky měření vzorků BS

Pokud srovnáme průběhy zkoušek zkušebních vzorků vyztužených basaltovou sítí v grafech průběhu zatížení, nalezeneme totožné znaky. Vzorky byly postupně zatěžovány, vznikly první viditelné trhliny, a postupovalo se dále až na mez pevnosti betonu. Po kolapsu betonové části vzorku převzala zatížení výztuž, která dokázala dlouhou dobu odolávat zatížení. Dostatečná únosnost použité výztuže dovolila desce při zatěžování odolávat poměrně vysokým hodnotám průhybu.

U desky BS-2 se hodnota průhybu desky vyšplhala až na 14,8 mm. Důsledkem vysokého průhybu se na vrchní části desky tvořili trhliny v soustředných kruzích směrem k místu zatěžování.



Obrázek 4.20: Soustředné trhliny vzniklé vysokých průhybem desky

Hlavním parametrem zkoušek bylo zjištění maximální hodnoty únosnosti desky a jejího průhybu. Z tohoto důvodu nebyly desky zatežovány až do úplného kolapsu.

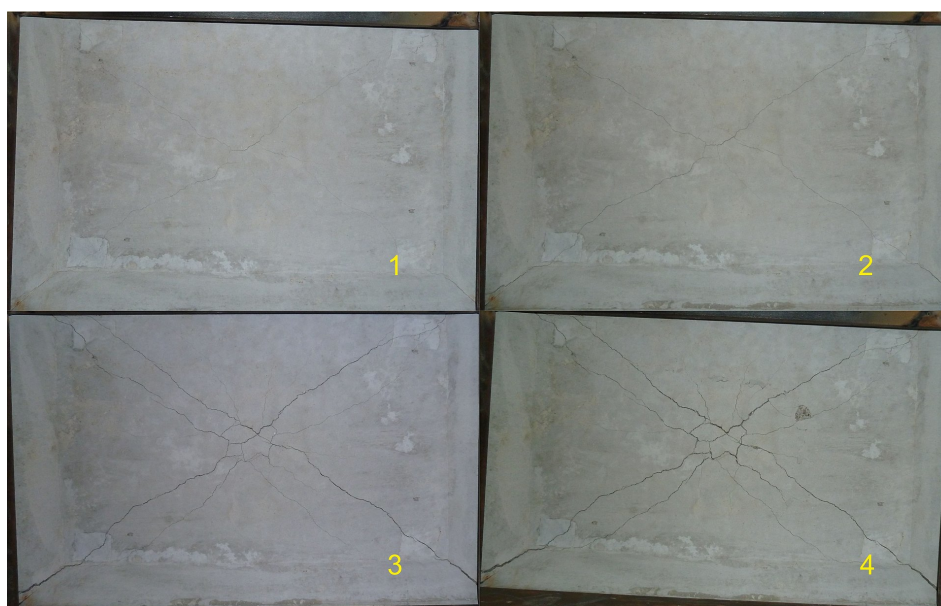


Obrázek 4.21: Deska BS po provedení zkoušky

4.3.3 Zkušební vzorky SV - Beton vyztužený sklovláknitou sítí

Posledním zkoušeným typem vzorků byly panely vyztužené pomocí sklovláknité sítě. Již před započítím zkoušení bylo předpokládáno, že únosnost tohoto typu vyztužení bude nejvyšší ze všech zkoušených typů vzhledem k použitému materiálu. Tomuto předpokladu byla přizpůsobena rychlost zatěžování. Konkrétně byla nastavena na hodnotu 0,01 mm/s jako u předešlých vzorků, v průběhu zkoušek byla hodnota posunu navýšena až na 0,05 mm/s.

Grafické znázornění průběhu zkoušek se v mnohém podobá zatěžování vzorků s basaltovou výztuží. Z počátku vznik malých trhlin ve spodní části desky až do meze pevnosti betonu. Následně přebírá napětí pouze výztuž, která je skokově porušována praskáním jednotlivých segmentů sítě.



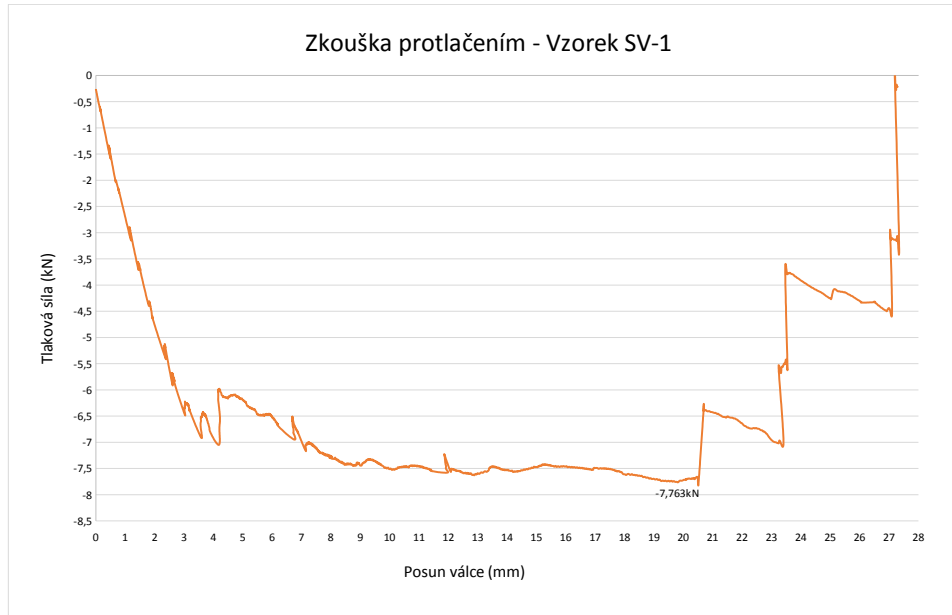
Obrázek 4.22: Porušení panelu SV při zatížení - spodní pohled

Pro ověření požadované pevnosti betonu v tlaku byly provedeny zkoušky pevnosti na betonových kostkách o hraně 15 cm. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v tabulce (viz tabulka **4.5 Pevnost v tlaku - beton C50/60 - pro vzorky SV**).

	Hmotnost (kg)	Pevnost v tlaku (MPa)
1	2,362	62,7
2	2,365	63,2
3	2,366	63,6

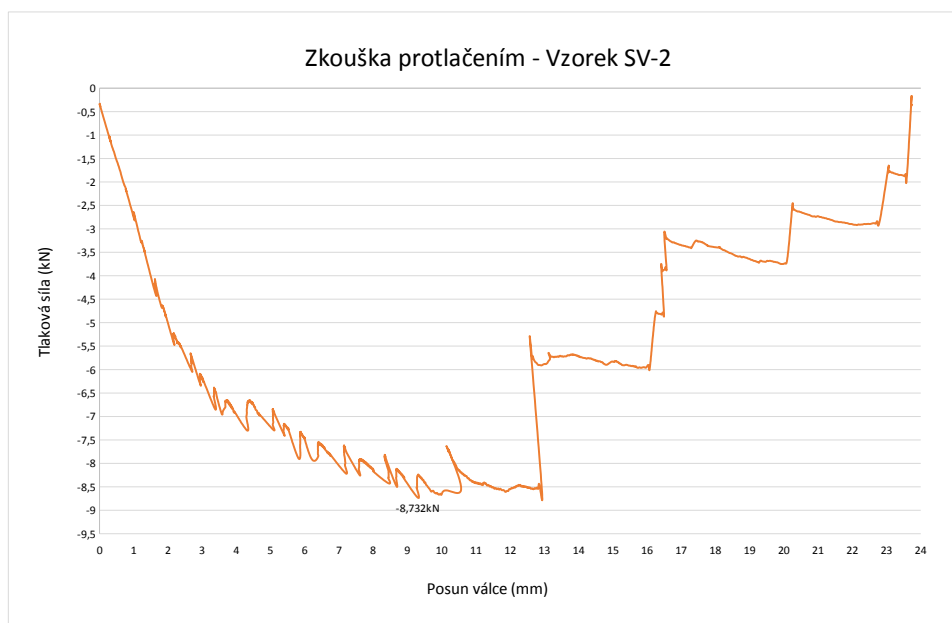
Tabulka 4.5: Pevnost v tlaku - beton C50/60 - pro vzorky SV

Vzorek SV-1 Již prvním zkoušeným vzorkem s použitím tohoto typu výztuže bylo zřejmé, že tento způsob vyztužení dokáže přenášet vysoké zatížení při velkém průhybu desky. Trhlínky znatelné pouhým okem byly na spodní části panelu viditelné až přibližně při 5,5 kN. K porušení segmentů výztužné sítě docházelo skokově. Po přerušení pramence sítě došlo k aktivaci širšího okruhu ok a k částečnému zpevnění až do porušení dalšího pramence sítě.



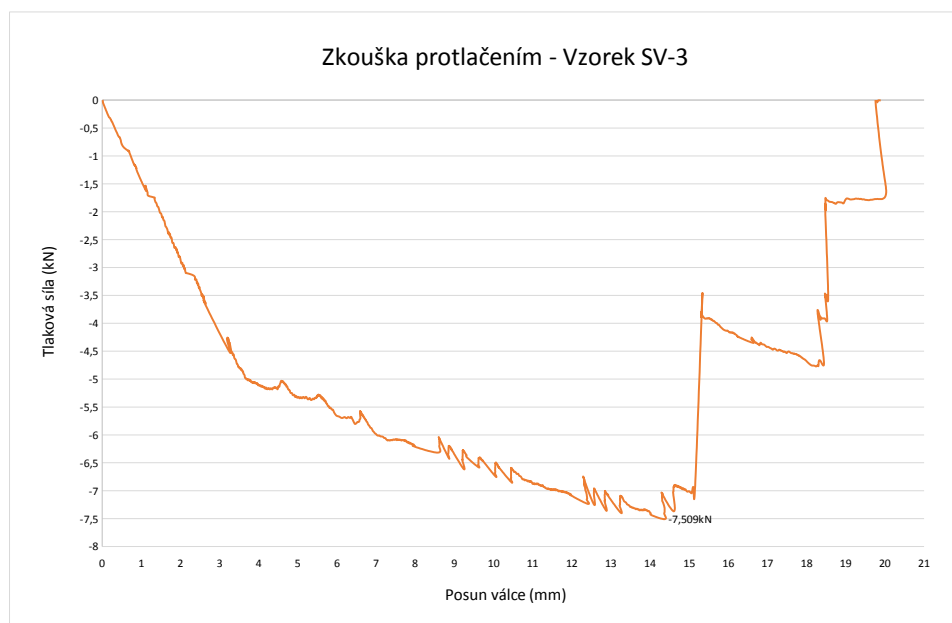
Obrázek 4.23: Graf průběhu zatěžování - vzorek SV-1

Vzorek SV-2 Během druhé zkoušky se začaly tvořit první trhliny okolo hodnoty zatížení 4 kN. I přes vznik trhlin dokázal vzorek odolávat nejvyššímu zatížení 8,7 kN. Pravá větev grafu znázorňující porušení výztužné sítě vzorku vykazuje podobné chování jako u prvního zkoušeného vzorku.



Obrázek 4.24: Graf průběhu zatěžování - vzorek SV-2

Vzorek SV-3 Poslední ze zkoušených vzorků vykazoval nejnižší únosnost ze všech panelů se sklovláknitou výztuží. Průběh grafu v levé části je obdobný jako u vzorku číslo 2. I přes vznik trhlin dokázal vzorek odolat zatížení 7,5 kN. V pravé části grafu je opět patrné skokové porušení jednotlivých segmentů výztužné sítě.



Obrázek 4.25: Graf průběhu zatěžování - vzorek SV-3

Shrnutí výsledků zkoušek panelů SV

Výsledky zkoušek provedených na panelech vyztužených pomocí sklovláknitých sítí jsou shrnuty v tabulce (viz tabulka **4.6 Výsledky měření vzorků SV**).

	Posouvající síla (kN)	Průhyb desky (mm)
Vzorek SV-1	7,763	19,800
Vzorek SV-2	8,732	9,304
Vzorek SV-3	7,509	14,371

Tabulka 4.6: Výsledky měření vzorků SV

Provedenými zkouškami bylo prověřeno, že použití sklovláknitých výztužných sítí patří mezi velmi únosný způsob vyztužování. Porovnávané průběhy zatěžování vzorků vykazují velmi podobné vlastnosti. Postupným zatěžováním vznikají slabé trhlinky, a po překročení meze pevnosti betonu přebírá zatížení výztuž. Postupné porušování výztuže probíhá skokově v závislosti na porušování jednotlivých segmentů výztužné sítě. Všechny provedené zkoušky byly po přerušení posledního pramence ukončeny - napětí v desce bylo nulové, což je patrné z výše uvedených grafů.



Obrázek 4.26: Deska SV po provedení zkoušky

Kapitola 5

Cenové srovnání variant vyztužení

Pro komplexní porovnání možné náhrady stávajícího způsobu vyztužení, bylo nutné zkoušené varianty posoudit z hlediska ceny. Již před započítáním celkového cenového srovnávání je ze základních cen materiálů patrné, že nová varianta vyztužení bude nákladnější oproti stávajícímu způsobu. Cílem tohoto srovnání nebylo najít nejlevnější variantu vyztužení, ale posoudit obecné vlastnosti materiálů a jejich cen.

Cenové srovnávání bylo zaměřeno na materiálovou část prvku a úpravu pracnosti, která se změní použitím nového způsobu vyztužení. Jak již bylo zmíněno, jedná se o prvky (střešní TT nosníky), které jsou individuálně rozměrově upravovány dle požadavků investora. S přihlédnutím k tomuto bodu bylo cenové srovnání aplikováno pro prvek průměrné velikosti. Pro tyto účely byl uvažován panel délky 20 m bez specifických úprav jako jsou otvory a podobně.

5.1 Původní cena prvku

Pro posouzení nových zvažovaných variant vyztužení je nutné vyčíslit cenu stávajícího způsobu vyztužení. Posuzovaný STT panel délky 20 m má objem cca 4,8 m³. Materiály použité pro jeho výrobu včetně ceny jsou uvedeny v tabulce (viz tabulka **5.1 Objem a cena materiálu pro výrobu STT panelu**). Celková cena za materiál je uvažována včetně technologických úprav, jako je míchání, svařování, ohýbání či předpínání.

Materiál	Cena za m.j.	Množství	Cena celkem
Beton C50/60	1 580 Kč/m ³	4,72 m ³	7 457,60 Kč
Betonářská výztuž	25 Kč/kg	33 kg/m ³	3 894,00 Kč
Předpínací výztuž	30 Kč/kg	77 kg/m ³	10 903,20 Kč
Kování	35 Kč/kg	2 kg/m ³	330,40 Kč
Závěsy a zabudované prvky	615 Kč/m ³	-	2 902,80 Kč
Cena materiálu celkem			25 488,00 Kč
PP vlákna	135 Kč/m ³	5 kg/m ³	965,25 Kč
Cena materiálu celkem vč.vláken			26 453,25 Kč

Tabulka 5.1: Objem a cena materiálu pro výrobu STT panelu

V rámci cenového porovnání je nutné uvažovat i změnu pracnosti při výrobě střešních panelů. Tento faktor je výrazně ovlivněn použitím nového typu vyztužení, kde již nepůjde o rozptýlenou výztuž, ale výztužné síť. V současné době je pro výrobu panelů počítáno se sazbou 6,5 hod/m³, která je oceněna na 180 Kč/hod. Výroba dvacetimetrového panelu STT činí přibližně 30,68 hodiny a stojí 5 522,40 Kč. V této ceně je zahrnuta veškerá práce při výrobě střešního panelu. Tedy úprava formy na požadovanou délku prvku, uložení výztuže, zmonolitnění, odbednění a manipulace s panelem v rámci areálu.

Při úvaze nad cenovým porovnáním nových způsobů vyztužení byly uvažovány pouze ceny za práci a materiál. Jedná se o hlavní investici při výrobě panelů. Konečná cena však zahrnuje mnohem více položek. Prodejní cena panelu zahrnuje režijní poplatky za provoz budovy, odpisy na formu, náklady na projekční práce, dopravu, montáž a samozřejmě započtení konečného zisku na výrobku. Jedná se o tzv. fixní náklady, které se se změnou typu vyztužení svrchní desky nemění. Nejsou tedy zahrnuty ani v konečném cenovém srovnání variant.

5.2 Ceny jednotlivých typů vyztužení

Při zvažování nových variant vyztužení bylo nutné v celkovém součtu materiálu nahradit cenu stávajícího způsobu vyztužení. S ohledem na výměnu rozptýlené výztuže za vyztužení pomocí sítě uložených na distančních tělískách, bylo nutné uvážit toto hledisko i pro celkovou pracnost při výrobě panelu. Ostatní složky ceny zahrnující poplatky na provoz, odpisy, projekční práce atd. již nebyly do dalších propočtů zahrnovány.

5.2.1 Varianta 1 - polypropylenová vlákna - původní

První varianta je variantou stávající, kde je cena již známa z obecného součtu cen materiálů (viz tabulka 5.1 **Objem a cena materiálu pro výrobu STT**

panelu). Celková cena panelu včetně vláken tak činí 26 453,25 Kč za dvacetimetrový STT panel. Cena práce strávené při výrobě panelu včetně úprav formy a následné manipulace s panelem vyjde na 5 522,40 Kč.

5.2.2 Varianta 2 - basatová mříž, distančníky Mates

Materiál Basaltové mříže se dodávají v šíři 0,8 m s návinem 30 m. Celková plocha slabé desky překrývající žebra panelu je při délce 20 m a šířce panelu 2,4 m rovna 48 m^2 . Z technologického hlediska výrobce předepisuje překrytí jednotlivých částí mříží o 1 oko, což odpovídá 50 mm. Tyto mříže tak pokryjí plochu desky s trojnásobným překrytím na šíři panelu ($3 \cdot (0,05 \text{ m} \cdot 20 \text{ m})$), což zvyšuje spotřebu výztuže o 3 m^2 na kus. K celkové spotřebě výztužné sítě je nutné připočítat případný prořez. Ten byl stanoven na 2% plochy a činí $0,96 \text{ m}^2$ výztuže. Celkově se započtením překrytí a prořezu je potřebná plocha výztuže pro jeden dvacetimetrový panel STT $51,96 \text{ m}^2$ basaltové sítě ROCKMESH. Cena výztužné sítě je 69 Kč/ m^2 vč. DPH, celkem 3 585,24 Kč.

Pro uložení výztužných mříží do bednění byly použity distančníky Mates s krytím 10 mm. Pro zajištění dostatečného krytí výztuže je nutné použít alespoň 3 ks těchto distančníků do 1 m^2 plochy panelu. Pro jeden panel s plochu 48 m^2 je potřeba 144 ks. Cena jednoho distančního prvku je 1,63 Kč/kus vč. DPH, celkem tedy 235,3 Kč.

Práce Při základní úvaze nad časovou náročností práce s výztužnými mřížemi je patrné, že doba umístění tohoto typu výztuže bude vyšší, než v případě PP vláken. Dobu výroby STT panelu s vrchní deskou z vláknobetonu lze uvažovat jako základní časovou jednotku (30,68 hodiny). Při dalším výpočtu bylo nutné pracnost výroby navýšit vzhledem k typu použité výztuže. Jako základní prvek byla normohodina pro armování stropní konstrukce, která je ukazatelem pracnosti pro práci s ocelovou vázanou výztuží. Normohodina činí 27 hodin práce pro zpracování 1 t ocelové výztuže. Jelikož se v našem případě jedná o ukládání mříží nekovové výztuže, které jsou podstatně lehčí a práce s nimi není natolik fyzicky náročná, byla normohodina snížena na 20 h/t. Práce s mřížemi z nekovové výztuže se ve velké míře podobá práci s klasickými ocelovými kari sítěmi. Pro výpočet tedy byla uvažována plošná hmotnost běžných ocelových kari sítí. Pracovní procesy při ukládání ocelové i nekovové výztuže jako je stříhání, překrývání a ukládání na distančníky jsou stejné. Nižší váhu sítí nahrazuje vlastnost těžších sítí držet tvar a umístění. Lehké nekovové výztuže se v bednění pohybují, mnohdy je nutné sítě bodově spojovat, aby nedošlo k vzájemnému posunu apod. Tím se rozdílné hmotnosti těchto materiálů při zpracování časově vyrovnávají.

Pro střešní panel o ploše 48 m^2 je při plošné hmotnosti ocelové kari sítě $2\,220 \text{ g/m}^2$ váha $0,1066 \text{ t}$, která při normohodině 20 hod/t navyšuje množství potřebných hodin na zpracování o $2,13 \text{ hod.}$ Celková doba pro uložení tohoto typu výztuže činí $32,81 \text{ hod.}$ Cena práce u tohoto typu výztužení je $5\,905,80 \text{ Kč.}$

Cena materiálu vč. DPH	29 073,24 Kč
Cena práce	5 905,80 Kč
Celková cena	34 979,04 Kč

Tabulka 5.2: Cena materiálu a práce - Basaltové mříže

5.2.3 Varianta 3 - sklovláknitá síť, distančníky Spacers

Materiál Sklovláknité sítě jsou dodávány v nenavinutém stavu jako panely velikosti $5 \times 1,2 \text{ m}$. Celková plocha slabé desky panelu je zmíněných 48 m^2 . Výrobce z technologického hlediska předepisuje překrytí sítí o 15 cm . V šíři panelu $2,4 \text{ m}$ bude síť překryta dvakrát ($2 \times (0,15 \text{ m} \times 20 \text{ m})$), což navyšuje spotřebu materiálu o 6 m^2 . Spolu s prořezem 2% je celková spotřeba výztužné sítě pro dvacetimetrový panel STT $54,96 \text{ m}^2$. Cena výztužných sítí činí 20 €/m^2 , což je při současném kurzu $25,50 \text{ Kč/€}$ cena 510 Kč/m^2 materiálu. Při roční spotřebě $5\,000 - 10\,000 \text{ m}^2$ materiálu byla výrobcem nabídnuta sleva 10% na tento materiál. Cena po slevě je 459 Kč/m^2 . Pro plochu včetně překrytí a prořezů je celková cena výztuže $25\,226,64 \text{ Kč vč. DPH.}$

Pro uložení sítí do bednění byly použity distanční prvky Spacers. Cena jednoho prvku je $0,31 \text{ €/ks}$, což je při současném kurzu $25,50 \text{ Kč/€}$ cena $7,91 \text{ Kč}$ za kus. Výrobcem předepsaná spotřeba pro dostatečné podepření sítí je minimálně 4 ks/m^2 . Na plochu 48 m^2 musí být použito 192 ks prvků Spacers. Celková cena za distanční prvky je $1\,518,72 \text{ Kč.}$

Práce Základní jednotkou je uvažována hodinová sazba na 20 m dlouhý panel ($30,68 \text{ hodiny}$). Jako v předchozím případě ponecháme výchozí normohodinu pro armování vodorovné konstrukce, 27 hodin na tunu. Sklovláknité sítě jsou oproti basaltovým sítím spojeny pryskyřicí do poměrně tuhých sítí, a tím jsou i znatelně těžší. S vyšší tuhostí sítí se navyšuje jejich celková váha, a s ní i pracnost vzniklá při jejich ukládání do bednění. Oproti basaltovým mřížím byla pracnost navýšena na 22 hodin na tunu. Dále bylo pokračováno jako v předešlém případě (viz kapitola 5.2.2 Varianta 2 - basatová mříž, distančníky Mates).

Pro plochu střešního panelu 48 m^2 , je při plošné hmotnosti ocelové kari sítě $2\,220 \text{ g/m}^2$ váha $0,1066 \text{ t}$, která při normohodině 22 hod/t navyšuje množství potřebných hodin na zpracování sklovláknité sítě o $2,345 \text{ hod.}$ Celková doba

pro uložení tohoto typu výztuže tak činí 33,025 hod. Cena práce u tohoto typu vyztužení je 5 944,50 Kč.

Cena materiálu vč. DPH	52 233,36 Kč
Cena práce	5 944,50 Kč
Celková cena	58 177,86 Kč

Tabulka 5.3: Cena materiálu a práce - Sklovláknité síť

5.3 Shrnutí cenové bilance typů vyztužení

Posledním z aspektů srovnávání variant vyztužení je porovnání variant vyztužení z hlediska ceny. Všechny zmiňované varianty byly porovnány jak z hlediska materiálového, tak z hlediska navýšení pracnosti. Celkové srovnání variant vyztužení z hlediska ceny materiálu a práce je uvedeno v tabulce (viz tabulka **5.4 Cena materiálu a práce - srovnání variant**).

	Cena materiálu vč. DPH	Cena práce	Celková cena
Polypropylenová vlákna	26 453,25 Kč	5 522,40 Kč	31 975,65 Kč
Basaltové mříže	29 073,24 Kč	5 905,80 Kč	34 979,04 Kč
Sklovláknitá síť	52 233,36 Kč	5 944,50 Kč	58 177,86 Kč

Tabulka 5.4: Cena materiálu a práce - srovnání variant

Cena materiálu Porovnání variant z hlediska ceny samotného materiálu ukazuje jako nejlevnější variantu stávající způsob vyztužení PP vlákny. Použitím basaltové výztuže by došlo k nárůstu ceny oproti původní o necelých 10%. Oproti tomu varianta vyztužení sklovláknitou sítí navyšuje původní cenu materiálu panelu na dvojnásobnou hodnotu, téměř o 97%.

Cena práce Vzhledem k použití rozptýlené výztuže, jakožto jednoho ze způsobů vyztužení střešních panelů, se tato varianta ukazuje s přihlédnutím k technologii zpracování jako varianta nejlevnější. Při zpracovávání byla doba potřebná k uložení výztuže navýšena. V případě použití basaltové mříže byla pracovní doba navýšena o 2,13 hodiny, což navýšilo cenu za práci o 7% oproti původní ceně. Při úvaze nad náročností práce se sklovláknitou sítí, byla vzhledem k její vyšší váze (oproti basaltovým mřížím), navýšena pracovní doba o 2,345 hodiny, což původní cenu navýšilo přibližně o 8%.

Celková cena V celkovém součtu vyšla nejlevněji stávající varianta vyztužení vlákny. Druhá z porovnávaných variant, vyztužení basaltovou mříží, je cenou nepatrně vyšší oproti původní variantě. Poslední posuzovaná varianta (sklovláknitá

síť) má vysoké pořizovací náklady, kvůli kterým prvek přestává být konkurence schopný na českém trhu.

Kapitola 6

Výsledné porovnání variant vyztužení

Úkolem práce, bylo celkové srovnání variant vyztužení z hlediska technologického, fyzikálního a ekonomického. Tyto parametry byly v rámci práce řešeny a popisovány. Vyhodnocení výsledků práce a posouzení vhodnosti použití vybraného typu vyztužení bylo shrnuto v níže uvedených tabulkách.

	PP vlákna	Basaltové síť	Sklovláknité rohože
Materiál	polypropylen	basalt	sklovlákno, pryskyřice
Hmotnost	0,88-0,92 g/cm ³	360 g/m ²	1 050 g/m ²
Pevnost v tahu	338 MPa	1 550 MPa	1 550 MPa
Modul pružnosti	1 550 MPa	70 000 MPa	72 000 MPa
Rozměr	5 kg pytle	svitek 0,8x30 m	sítě formátu 5x1,2 m

Tabulka 6.1: Základní parametry posuzovaných výztuží

	VL - PP vlákna	BS - Basaltové síť	SV - Sklovláknité rohože
Posouvající síla			
Vzorek 1	7,511 kN	5,633 kN	7,763 kN
Vzorek 2	4,955 kN	5,881 kN	8,732 kN
Vzorek 3	5,598 kN	5,598 kN	7,509 kN
Průhyb desky			
Vzorek 1	5,496 mm	4,444 mm	19,800 mm
Vzorek 2	4,911 mm	14,864 mm	9,304 mm
Vzorek 3	5,598 mm	8,002 mm	14,371 mm

Tabulka 6.2: Pevnostní parametry posuzovaných výztuží

VL - Polypropylenová vlákna	
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> - jednoduchá aplikace přimícháním vláken do míchačky - při správném promísení vzniká homogenní materiál - odpadá řešení umístění výztuže a distance od bednění - snížení pracnosti oproti použití výztužných sítí - snadná manipulace s výztuží, balení po 5 kg pytlích
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> - možnost špatného rozmísení vláken (suchý a mokří ježci) - vlastnosti závisí na rozmísení vláken - při dodatečném vmíchání vzniká riziko rozmísení složek betonu - problematické uhlazování konečného povrchu - u STT se musí provádět dva rozdílné typy betonů - s/bez vláken
BS - Basaltové výztužné sítě	
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> - nízká hmotnost, snadná manipulace - variabilní, lze snadno tvarovat - navinutá ve svitcích - délka svitků snižuje množství prořezu a stykování - oka 50x50mm, bez nutnosti úpravy receptury beton. směsi
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> - navinutí do svitku -výztuž je po roztažení neforemná - špatná dostupnost distančních prvků pro slabou desku - nutnost stykování přesahem - vyšší pracnost při ukládání do bednění - vzhledem k nízké hmotnosti nutné kotvit (pohybuje se)
SV - Rohože ze skelných vláken	
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> - nižší hmotnost než u ocelových sítí - jsou tuhé, po usazení se nepohybují - vlastní distanční tělíska - lze je mírně ohýbat - velmi tenké
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> - vyšší hmotnost oproti basaltovým mřížím - malá oka, problematické protékání betonu - formát 1,2x5 m - vyšší prostřih - špatná soudržnost s betonem - stykování o 15 cm, nárůst spotřeby

Tabulka 6.3: Technologické parametry posuzovaných výztuží

	VL - PP vlákna	BS - Basaltové sítě	SV - Sklovláknité rohože
Cena materiálu	26 453,25 Kč	29 073,24 Kč	52 233,36 Kč
Cena práce	5 522,40 Kč	5 905,80 Kč	5 944,50 Kč
Celková cena	31 975,65 Kč	34 979,04 Kč	58 177,86 Kč

Tabulka 6.4: Ekonomické parametry posuzovaných výztuží

Kapitola 7

Závěr

Úkolem této bakalářské práce byla úvaha nad náhradou stávajícího typu vyztužení slabých krycích desek střešních panelů. Řešená problematika se zabývá náhradou stávajícího vyztužení rozptýlenou výztuží jiným typem nekovového vyztužení. V práci byly porovnány parametry vybraných výztuží z hlediska technologického, fyzikálně mechanického a ekonomického. Celkové srovnání vybraných variant je uvedeno ve výše uvedených tabulkách (viz kapitola **6 Výsledné porovnání variant vyztužení**), čímž bylo dosaženo stanovených cílů práce.

V úvodu práce byla obecně popsána problematika zastřešování halových objektů. Podrobněji jsou zde zmíněny předpjaté panely typu TT, na které je tato práce zaměřena. Následující kapitola je obecným seznámením s problematikou prefabrikace, konkrétně výrobou železobetonových prefabrikovaných stropních prvků. Práce byla zaměřena na vyztužování slabých krycích desek stropních panelů typu TT pomocí vybraných typů nekovových výztuží. Jako alternativy vyztužení stávající desky vyztužované polypropylenovými vlákny byly vybrány dvě varianty. Jednalo se o basaltové mříže a sklovláknité sítě. Použití těchto vybraných nekovových výztuží bylo podrobně řešeno v další kapitole. Zde byly výztužné materiály popisovány z hlediska složení, technologie výroby i vyráběných typů.

Řešená problematika byla aplikována a zkoušena na reálně vyráběných STT panelech. Z počátku byl proveden průzkum vyráběných prvků, pro které mělo být porovnání zpracováváno. Následně bylo nutné určit způsob prověření únosti jednotlivých typů vyztužení. Pro tyto účely byl určen tvar zkušebních prvků, které nejlépe vystihují skutečné podmínky aplikované u STT panelu. Prvky byly zkoušeny při celobvodovém podepření, a zatěžovány centrickou silou působící na předepsané ploše. Výsledky zkoušek a grafické znázornění průběhu zatěžování se staly podkladem pro předpovídání chování typu vyztužení a stanovení maximální možné hodnoty zatížení.

Posledním parametrem porovnávání typů byla ekonomická náročnost nové varianty vyztužení. Na základě podkladů poskytnutých výrobcem střešních

panelů o reálné ceně materiálu a práce při výrobě panelů, byla stanovena základní cena panelu. Ceny pro porovnání nových variant vyztužení bylo nutné zjistit přímo od výrobců. Společně s informacemi o ceně nových typů výztuží, a s upravením pracnosti výroby, byly sestaveny orientační ceny sloužící pro porovnání variant vyztužení.

Všechny parametry sloužící pro rozhodování o novém způsobu vyztužení byly pro přehlednost v závěru práce sepsány do tabulek. Porovnáme-li tyto varianty z hlediska technologického, zůstává nejvhodnějším způsobem vyztužení rozptýlená výztuž, jelikož odpadá nutnost ukládání výztuže do bednění. Při úvaze nad únosností výztužných materiálů se ukázala jako nejvhodnější varianta sklovláknitá síť, která dokázala přenést zatížení až 8,7 kN. Tento způsob vyztužení však v cenovém porovnání variant dosahuje téměř dvojnásobné ceny oproti ostatním způsobům vyztužení. Z cenového srovnání vyplývá, že nejlevnější variantou stále zůstává vyztužení pomocí PP vláken, ačkoliv použití basaltových mříží je jen nepatrně dražší.

S přihlédnutím ke všem porovnávaným parametrům způsobů vyztužení vychází nejlépe použití basaltových mříží. Oproti vláknité výztuži je možné kontrolovat rozmístění výztuže v prvku. Prvky vyztužené basaltovými mřížemi sice nevykazovaly znatelně vyšší pevnost oproti PP vláknům, za to po prvních známkách porušení dokázaly stále disponovat vysokou únosností. Jelikož se jedná o poměrně velký zásah do současné technologie výroby těchto panelů, je na firmě samotné, zda použije výsledky této práce pro budoucí změny, či nikoliv.

Seznam obrázků

2.1	Monofilamentická vlákna [3]	14
2.2	Fibrilovaná vlákna [3]	15
2.3	Makrovlákna [3]	15
2.4	Kompozitní čedičová síť ROCKMESH Ø2,2 mm, 50x50 mm [10]	18
2.5	Výztužná síť Solidian GRID Q97/97 - AAE - 38 [7]	20
2.6	Porovnání hodnot krytí u běžné výztuže a výztužných sítí Solidian [7]	21
3.1	Střešní nosník TT [1]	22
3.2	Střešní nosník TT - spodní pohled [1]	23
3.3	Vyztužení stropního panelu STT	23
3.4	Speciální svařovaná síť	24
4.1	Zkouška sednutím (Abrams) - Slump test [3]	27
4.2	Zkouška rozlitím [3]	27
4.3	Zkušební panely č.1 - Beton C50/60 vyztužen PP vlákny	29
4.4	Distanční prvek firmy Hüwa cz - krytí 10 mm, celková výška 3 cm	30
4.5	Distanční tělísko s krytím 10 mm - BetonPlast s.r.o. - Mates	30
4.6	Zkušební panely č.2 - Beton C50/60 vyztužen basaltovou sítí ROCKMESH 50x50 mm, distančníky Mates 10 mm	31
4.7	Výztužné síť Solidian GRID Q97/97 - AAE - 38	31
4.8	Zkušební panely č.3 - Beton C50/60 vyztužen sklovláknitou sítí Solidian GRID Q97/97 - AAE - 38, distančníky Spacers	32
4.9	Ocelový zkušební stůl	32
4.10	Zkušební sestava	34
4.11	Porušení panelu VL při zatížení - spodní pohled	35
4.12	Graf průběhu zatěžování - vzorek VL-1	36
4.13	Graf průběhu zatěžování - vzorek VL-2	37
4.14	Graf průběhu zatěžování - vzorek VL-3	38
4.15	Deska VL po provedení zkoušky	39
4.16	Porušení panelu BS při zatížení - spodní pohled	40
4.17	Graf průběhu zatěžování - vzorek BS-1	41

4.18	Graf průběhu zatěžování - vzorek BS-2	42
4.19	Graf průběhu zatěžování - vzorek BS-3	43
4.20	Soustředné trhliny vzniklé vysokých průhybem desky	44
4.21	Deska BS po provedení zkoušky	45
4.22	Porušení panelu SV při zatížení - spodní pohled	45
4.23	Graf průběhu zatěžování - vzorek SV-1	46
4.24	Graf průběhu zatěžování - vzorek SV-2	47
4.25	Graf průběhu zatěžování - vzorek SV-3	48
4.26	Deska SV po provedení zkoušky	49

Seznam tabulek

2.1	Technické údaje - Vlákná BASF MasterFiber 230 [5]	16
2.2	Technické údaje - ROCKMESH Ø2,2 mm, 50x50 mm [8]	18
2.3	Technické údaje - Solidian GRID Q97/97 - AAE - 38 [8]	20
4.1	Pevnost v tlaku - beton C50/60 - pro vzorky VL	35
4.2	Výsledky měření vzorků VL	39
4.3	Pevnost v tlaku - beton C50/60 - pro vzorky BS	40
4.4	Výsledky měření vzorků BS	44
4.5	Pevnost v tlaku - beton C50/60 - pro vzorky SV	46
4.6	Výsledky měření vzorků SV	49
5.1	Objem a cena materiálu pro výrobu STT panelu	51
5.2	Cena materiálu a práce - Basaltové mříže	53
5.3	Cena materiálu a práce - Sklovláknité sítě	54
5.4	Cena materiálu a práce - srovnání variant	54
6.1	Základní parametry posuzovaných výztuží	56
6.2	Pevnostní parametry posuzovaných výztuží	56
6.3	Technologické parametry posuzovaných výztuží	57
6.4	Ekonomické parametry posuzovaných výztuží	57

Literatura

- [1] KŠ PREFA. Ksprefa [online]. Praha: KŠ PREFA, 2018 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://ksprefa.cz/produkty>
- [2] ŠILHAN PH.D., Ing. Ondřej. Využití syntetické kompozitní výztuže v moderním stavitelství. SILNICE, ŽELEZNICE [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o, 2010 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/vyuziti-synteticke-kompozitni-vyztuze-v-modernim-stavitelstvi/>
- [3] EBETON. EBETON [online]. Praha: CZ SVB, 2018 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy>
- [4] KREJČA, Petr, Ing. Jan VESELÝ a Ing. Vladimír VESELÝ. Beton s rozptýlenou výztuží. ABS - portal.cz [online]. Praha: JAGA GROUP, 2010 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/beton/beton-srozptylenou-vyztuzi>
- [5] MasterFiber – výztužná vlákna do betonu pro omezení tvorby trhlin. BASF [online]. Praha: BASF Group, 2018 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.master-builders-solutions.basf.cz/cs-cz/products/masterfiber>
- [6] VODIČKA, Jan, Vladimír VESELÝ a Jiří KRÁTKÝ. SPECIFIKA Z TECHNOLOGIE VLÁKNOBETONU. BETON TKS [online]. 2010, 2010(2), 1 - 5 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2010-2-38_0.pdf
- [7] Solidian [online]. Albstadt: solidian, 2018 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: www.solidian.com/en
- [8] PROCHÁZKA, Ing. Miroslav. Kompozitní výztuž do betonu. Tzbinfo [online]. Praha: Topinfo, 2017 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://stavba.tzbinfo.cz/beton-malty-omitky/16273-kompozitni-vyztuz-do-betonu>

-
- [9] Kompozitní výztuže. PREFA Kompozity [online]. Brno: VERTIGO.CZ, 2015 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: http://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/katalog_kompozitni_vyztuze_cze_m.pdf
- [10] ŽELEX - Kotača.cz [online]. Blatnice pod Svatým Antonínkem: Ing. Jiří Kotača - želix, 2017 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: www.kotaca.cz
- [11] ČSN EN 1991-1-1 Zatížení konstrukcí: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. 2004. Praha: Český normalizační institut, 2004.

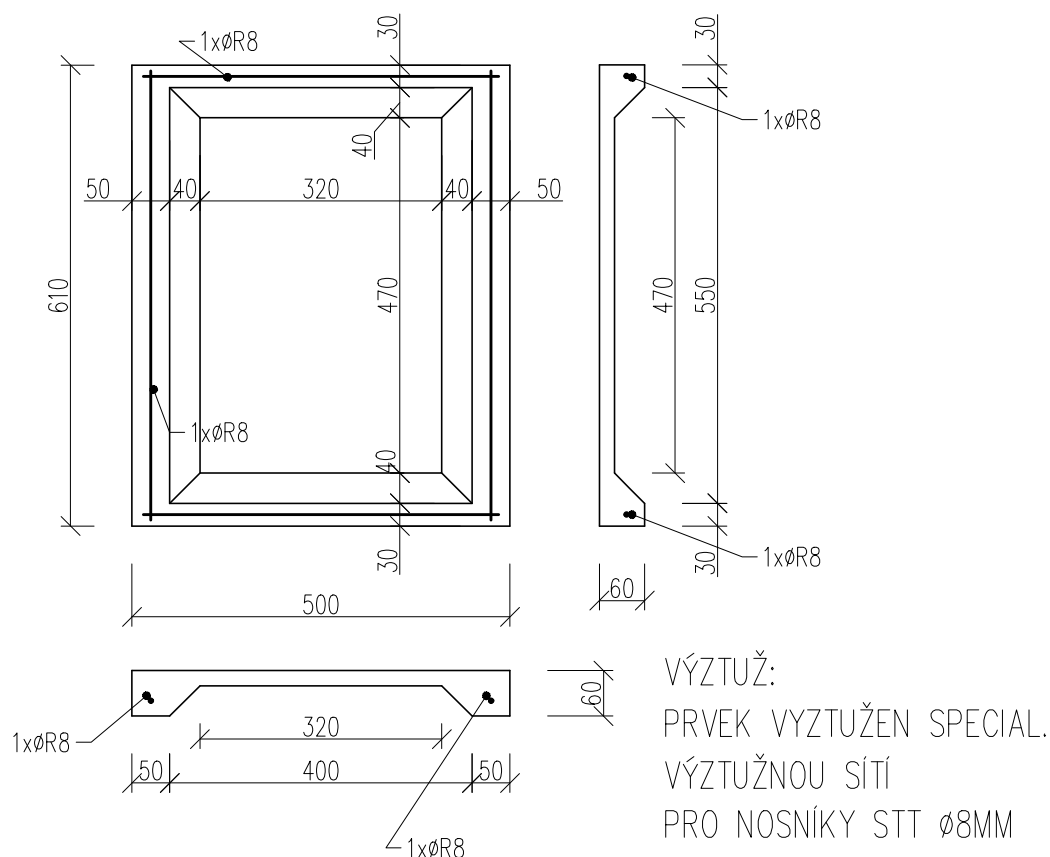
Přílohy

Příloha A

Výkres tvaru zkušební desky

NÁHRADA PP VLÁKEN NEKOVOVOU VÝZTUŽÍ

TVAR PRVKU – VÝZTUŽ



PLÁN ZKOUŠEK:

– JEDEN VZOREK: OBJEM $0,0155\text{m}^3 = 15,5\text{l}$ BETONU, HMOTNOST 38,5kg

1.ETAPA – 3 ZKUŠEBNÍ VZORKY

- ŽEBÍRKA VYZTUŽENA KARI SÍTÍ PRO STT Ø8MM
- DESKA VYZTUŽENA ROZPTÝLENOU VÝZTUŽÍ – BASF MasterFiber 230 (PRO JEDEN VZOREK CCA 77,5g VLÁKEN)

2.ETAPA – 3 ZKUŠEBNÍ VZORKY

- ŽEBÍRKA VYZTUŽENA KARI SÍTÍ PRO STT Ø8MM
- DESKA VYZTUŽENA BASALTOVOU MŘÍŽÍ ROCKMESH 50x50, Ø2,2mm, KRYTÍ POMOCÍ DISTANČNÍKŮ 10mm (4 KS/1 VZOREK)

3.ETAPA – 3 ZKUŠEBNÍ VZORKY

- ŽEBÍRKA VYZTUŽENA KARI SÍTÍ PRO STT Ø8MM
- DESKA VYZTUŽENA SKLOVLÁKNITOU SÍTÍ SOLIDIAN Q 97/97,

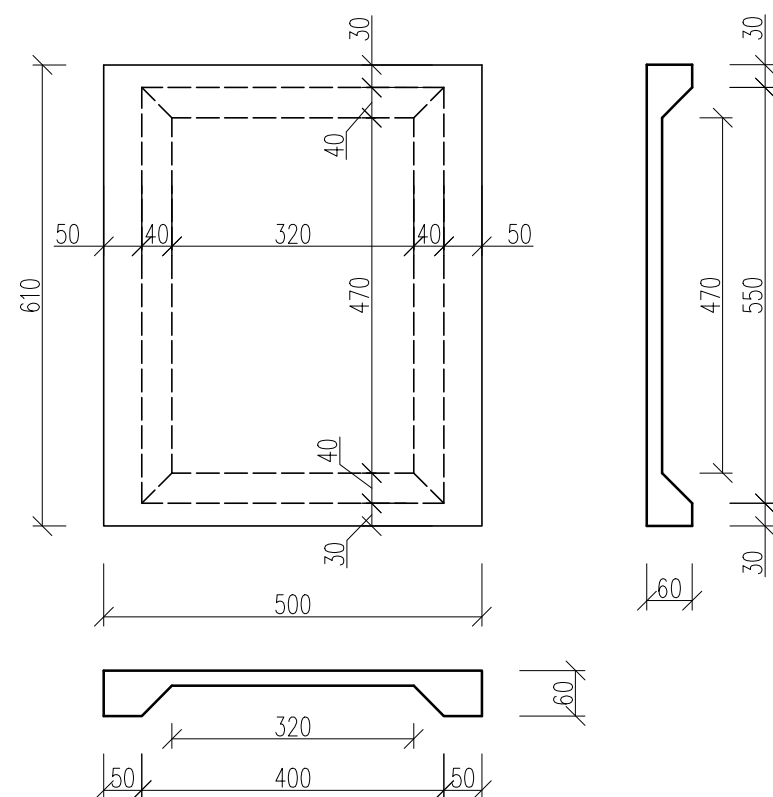
Kreslil: Kosíková L.
Měřítko: 1:10

Příloha B

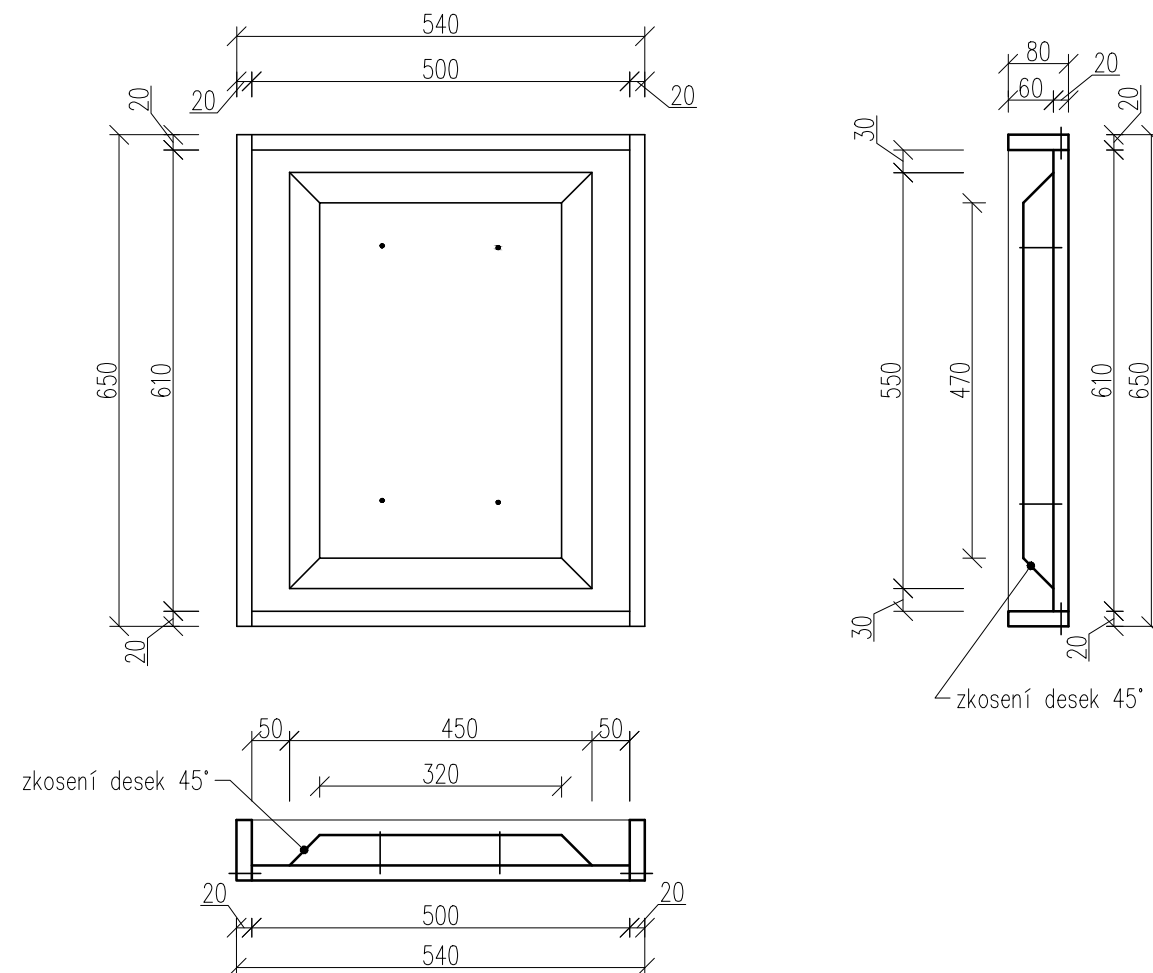
Výkres formy zkušební desky

ZKUŠEBNÍ VZORKY – NÁHRADA PP VLÁKEN NEKOVOVOU VÝZTUŽÍ

TVAR PRVKU



FORMA PRVKU



MATERIÁL (JEDNA FORMA):

- STŘEDOVÝ PANEL OCELOVÝ (VYJMUT PŘÍMO Z FORMY PRO STT PANELY)
- VODĚDOLNÁ PŘEKLIŽKA WESTAG Phoenox special tl.20mm
 - SPODNÍ DESKA (0,61x0,50m)
 - 1. BOČNÍ DESKA 2x(0,65x0,08m)
 - 2. BOČNÍ DESKA 2x(0,5x0,08m)

Celkem 0,49m²

POZNÁMKY:

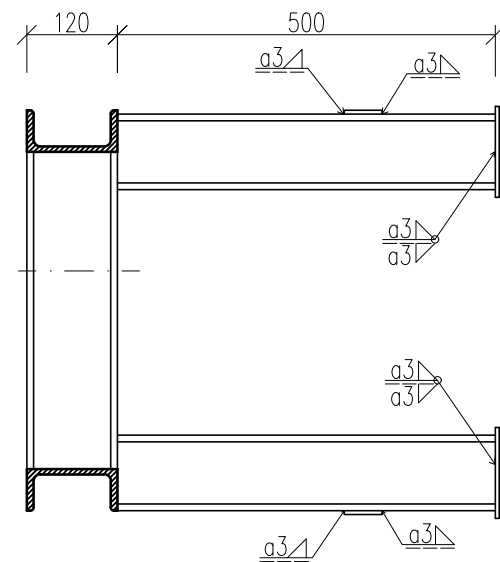
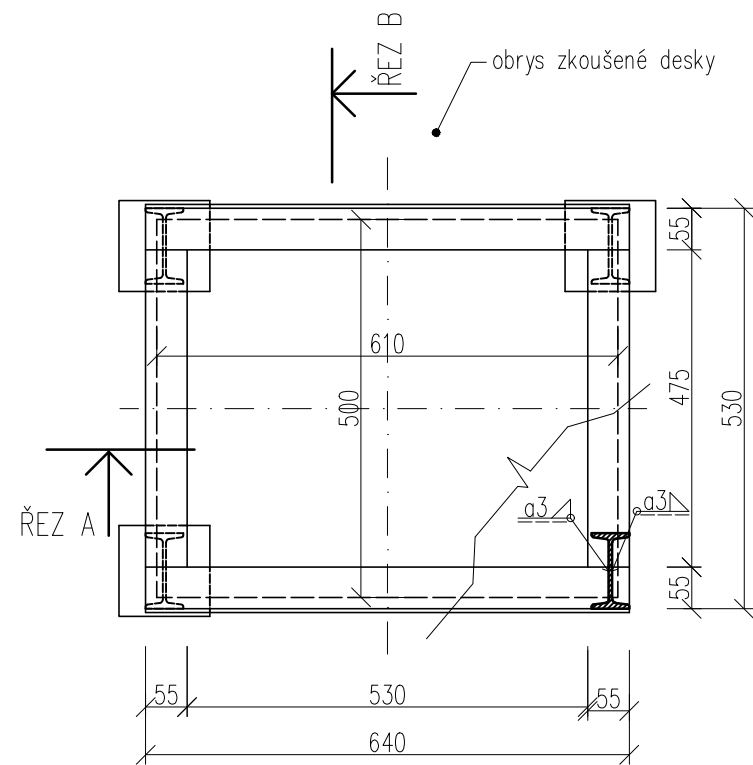
- BUDOU VYROBENY 3KS FOREM
- OBVODOVÉ PRUHY DESEK PŘÍŠROUBOVAT Z BOKU MIN. 3x
- OCELOVÝ STŘEDOVÝ PANEL PŘÍŠROUBOVAT 4x (ŠROUBY JSOU SOUČÁSTÍ PANELŮ)
- HLAVY ŠROUBŮ PO PŘÍŠROUBOVÁNÍ ZAČISTIT SILIKONOVÝM TMELEM

Příloha C

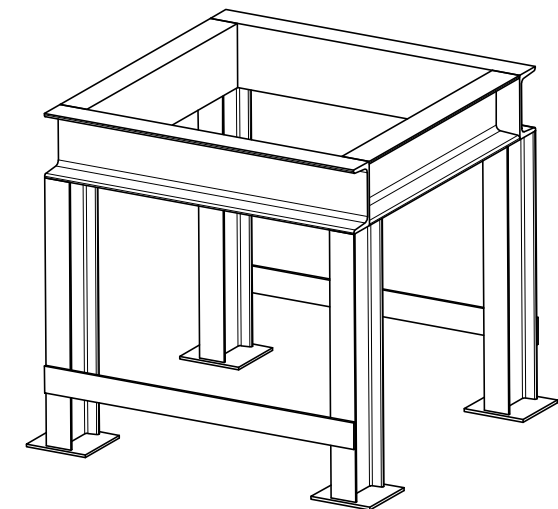
Výkres zkušebního stolu

TESTOVACÍ RÁM – NÁHRADA PP VLÁKEN NEKOVOVOU VÝZTUŽÍ

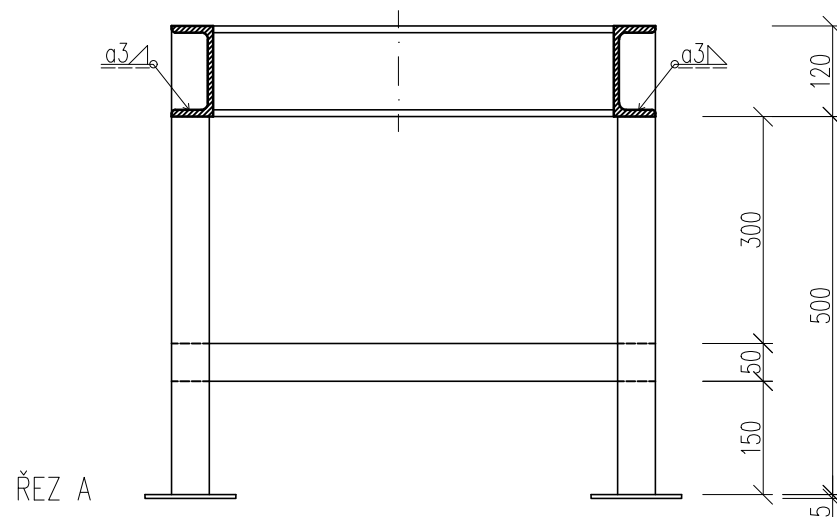
HORNÍ POHLED



ŘEZ B



3D MODEL



ŘEZ A

MATERIÁL:

RÁM – VÁLCOVANÝ PROFIL U120 (ALTERNATIVA U100)

2x0,64m, 2x0,47mm

STOJNY – VÁLCOVANÝ PROFIL I100 (ALTERNATIVA I120, U100, U120)

4x0,5mm

VODOROVNÉ ZTUŽENÍ – PÁSOVÁ OCEL tl.5mm

2x(640x50mm)

PATKY – OCELOVÁ DESKA tl.5mm

4x(120x120mm)